

UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA

BORANG PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR PENYELIDIKAN

TAJUK PROJEK : **PEMBANGUNAN TEKNIK KAWALAN PENCEMARAN**
MENGGUNAKAN PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR
DENGAN ALIRAN BERPUSAR

Saya MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR
(HURUF BESAR)

Mengaku membenarkan Laporan Akhir Penyelidikan ini disimpan di Perpustakaan
Universiti Teknologi Malaysia dengan syarat-syarat kegunaan seperti berikut :

1. Laporan Akhir Penyelidikan ini adalah hakmilik Universiti Teknologi Malaysia.
2. Perpustakaan Universiti Teknologi Malaysia dibenarkan membuat salinan untuk tujuan rujukan sahaja.
3. Perpustakaan dibenarkan membuat penjualan salinan Laporan Akhir Penyelidikan ini bagi kategori TIDAK TERHAD.
4. * Sila tandakan (/)

☐

SULIT

(Mengandungi maklumat yang berdarjah keselamatan atau kepentingan Malaysia seperti yang termaktub di dalam AKTA RAHSIA RASMI 1972).

☐

TERHAD

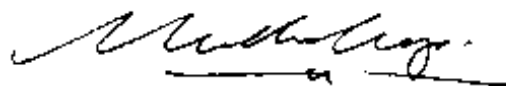
(Mengandungi maklumat TERHAD yang telah ditentukan oleh Organisasi/badan di mana penyelidikan dijalankan).

☒

TIDAK TERHAD

MOHAMMAD NAZRI MOHD JAAFAR
Ketua Projek
Fakulti Kejuruteraan Mekanikal
Universiti Teknologi Malaysia
81310 UTM Skudai, Johor

TANDATANGAN KETUA PENYELIDIK



Nama & Cop Ketua Penyelidik

Tarikh : 26/5/05

CATATAN : *Jika Laporan Akhir Penyelidikan ini SULIT atau TERHAD, sila lampirkan surat daripada pihak berkuasa/organisasi berkenaan dengan menyatakan sekali sebab dan tempoh laporan ini perlu dikelaskan sebagai SULIT dan TERHAD.

**PEMBANGUNAN TEKNIK KAWALAN PENCEMARAN MENGGUNAKAN
PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR DENGAN ALIRAN BERPUSAR**

PENYELIDIK:

PROF. MADYA DR. MOHAMMAD NAZRI MOHD. JAAFAR (KETUA)

DR. AZEMAN MUSTAFA

PROF. MADYA HAMIDON MUSA

DR. MOHD. YUSUF SENAWI

WAN ZAIDI WAN OMAR

IR. DR. HJ. KAMSANI ABDUL MAJID

MOHAMAD SHAIFUL ASHRUL ISHAK

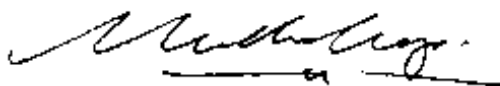
NO. VOT PENYELIDIKAN:

74088

**FAKULTI KEJURUTERAAN MEKANIKAL
UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA**

2005

“Saya akui laporan penyelidikan bertajuk “**PEMBANGUNAN TEKNIK KAWALAN
PENCEMARAN MENGGUNAKAN PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR
DENGAN ALIRAN BERPUSAR**” adalah hasil kerja saya sendiri kecuali nukilan dan
ringkasan yang tiap-tiap satunya telah saya jelaskan”



Tandatangan :
Nama Penulis : **Mohammad Nazri Mohd. Jaafar**
Tarikh : **26 Mei, 2005**

PEMBANGUNAN TEKNIK KAWALAN PENCEMARAN MENGGUNAKAN PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR DENGAN ALIRAN BERPUSAR

(Katakunci: Pembakaran, Aliran pusar, Gas ekzos, Emisi NO_x)

ABSTRAK

Penyelidikan dijalankan ke atas sebuah pembakar berbahan api cecair yang menggunakan pemusar udara bilah lengkung aliran jejarian bernombor pusar, SN dari 0.046 hingga 1.911. Pembakar suntikan nozel bahan api tunggal digunakan dalam ujian pembakaran bagi melihat pengaruh nombor pusar terhadap pembentukan emisi terutama NO_x dan emisi-emisi lain seperti CO, UHc dan CO_2 . Aliran pusar memberi kesan dalam pembentukan zon edaran semula yang akan bertindak sebagai halangan aerodinamik di mana akan membantu dalam menstabilkan nyalaan, percampuran udara dan bahan api serta pembentukan bahan cemar. Dengan kaedah ini didapati penurunan emisi NO_x sehingga 26% diperolehi apabila pemusar bernombor pusar, SN=1.427 dibandingkan dengan pemusar SN=0.046. Satu kaedah meningkatkan kecekapan percampuran bahan api udara dan menghasilkan daya edaran semula yang tinggi adalah dengan menyelitkan plat orifis pada bahagian satah keluaran pemusar, iaitu pada laluan masuk campuran bahan api udara ke kebuk pembakaran. Penyelitan plat orifis ini akan menyebabkan peningkatan terhadap kehilangan tekanan di bahagian keluaran pemusar dan seterusnya meningkatkan aliran gelora yang akan menambah kadar percampuran bahan api dengan udara. Kaedah ini memberi pengurangan emisi NO_x sehingga 22% jika dibandingkan dengan tanpa penyelitan orifis.

Penyelidik utama:

Prof. Madya Dr. Mohammad Nazri Mohd. Jaafar (Ketua)

Dr. Azeman Mustafa

Prof. Madya Hamidon Musa

Dr. Mohd. Yusuf Senawi

Wan Zaidi Wan Omar

Ir. Dr. Hj. Kamsani Abdul Majid

Mohamad Shaiful Ashrul Ishak

Email: nazri@fkm.utm.my

Tel. No.: 607-5534661

Fax. No.: 607-5566159

DEVELOPMENT OF POLLUTION CONTROL TECHNIQUE USING LIQUID FUEL BURNER WITH SWIRLING FLOW

(Keywords: Combustion, Swirling flow, Exhaust Gas, NO_x emission)

ABSTRACT

A liquid fuel burner system with curved radial air swirler vane angles with swirl number (SN) variation between 0.046 to 1.911 has been investigated. A combustor with single central fuel nozzle is used to determine the effect of swirl number in emissions formation especially NO_x and other emissions such as CO, UHc and CO₂. Swirling flow affect the recirculation zone provides the aerodynamics blockage to stabilise the flame, improved mixing between air and fuel and formation of emissions. NO_x reduction of more than 26% was obtained for the swirl number of 1.427 compared to 0.046. In order to achieve enhanced recirculation zone and better control of mixing process, a swirler consisting of an orifice plate at the outlet of radial swirler was introduced. The purpose of orifice plate insertion was to create the swirler pressure loss at the swirler outlet so that the swirler outlet shear layer turbulence was maximized to assist in mixing of air and fuel. This technique showed reduction of about 22% of NO_x emissions were obtained compared to non-orifice assistance.

Key researcher:

Prof. Madya Dr. Mohammad Nazri Mohd. Jaafar (Head)

Dr. Azeman Mustafa

Prof. Madya Hamidon Musa

Dr. Yusof Senawi

Wan Zaidi Wan Omar

Ir. Dr. Hj. Kamsani Abdul Majid

Mohamad Shaiful Ashrul Ishak

Email: nazri@fkm.utm.myT

Tel. No.: 607-5534661

Fax. No.: 607-5566159

PENGHARGAAN

Para penyelidik ingin mengucapkan setinggi-tinggi penghargaan dan terima kasih kepada Kementerian Sains Teknologi dan Inovasi Malaysia (MOSTI) di atas penganugerahan geran penyelidikan dan Universiti Teknologi Malaysia kerana membantu dalam menguruskan penyelidikan ini. Penyelidikan ini dibiayai di bawah skim IRPA melalui nombor projek 08-02-06-0030 EA207. Penghargaan dan terima kasih juga kepada pelajar-pelajar ijazah pertama, ijazah sarjana dan juruteknik-juruteknik di atas bantuan dan idea yang diberikan sepanjang penyelidikan ini dijalankan. Akhir sekali terima kasih kepada Pusat Pengurusan Penyelidikan (RMC, UTM) dan Jawatankuasa Penyelaras Penyelidikan, Fakulti Kejuruteraan Mekanikal, UTM di atas segala pertolongan dalam menjayakan penyelidikan ini.

KANDUNGAN

BAB	MUKA SURAT
JUDUL KAJIAN	ii
PENGAKUAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
PENGHARGAAN	vi
KANDUNGAN	vii
SENARAI JADUAL	xi
SENARAI RAJAH	xii
SENARAI SIMBOL	xv
SENARAI LAMPIRAN	xviii

1	Pengenalan	
1.1	Kesan Buruk Oksida Nitrogen (NO _x)	2
1.2	Kesan Emisi NO _x terhadap alam sekitar	
1.2.1	Hujan Asid	2
1.2.2	Penipisan Lapisan Ozon	3
1.2.3	Kenaikan Suhu Bumi	5
1.2.4	Asbut fotokimia	6
1.3	Kesan NO _x ke atas Kesihatan Manusia dan Haiwan	7
1.4	Kepentingan Penyelidikan	8

1.5	Objektif dan skop penyelidikan	
1.5.1	Objektif	9
1.5.2	Skop Penyelidikan	10
1.6	Gariskasar Laporan	10

2 KAJIAN LITERATUR EMISI DAN KAWALAN EMISI DARI PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR DAN FAKTOR AERODINAMIK DALAM SISTEM PEMBAKARAN

2.1	Peraturan dan Akta Pencemaran	11
2.2	Emisi dari Pembakar	14
2.2.1	Karbon Monoksida (CO)	14
2.2.2	Hidrokarbon Tak Terbakar (UHC)	16
2.3	Emisi Oksida Nitrogen, NO _x	17
2.3.1	Faktor kimia dalam pembentukan NO _x	18
2.3.2	Mekanisma Zeldovich	18
2.3.3	Mekanisma Fenimore	22
2.3.4	Pembentukan NO _x Bahan Api	24
2.3.5	Pembentukan NO _x di dalam Sistem Praktikal	25
	2.3.5.1 Pembentukan NO _x di dalam pembakaran pra-campur	25
	2.3.5.2 Pembentukan NO _x di dalam pembakaran tiada pra-campur	26
2.4	Pendekatan untuk merekabentuk pembakar beremisi rendah	27
2.5	Pengubahsuaian proses pembakaran	28
2.5.1	Pembakar rendah NO _x	28
2.6	Penggunaan aliran pusar dan kesan pusaran dalam pembakaran	30
2.6.1	Kesan-kesan utama aliran pusar	32
2.6.2	Ciri-ciri aliran pusar	33
2.6.3	Nombor Pusar, S _N	33

2.6.3.1	Aliran pusaran lemah ($S_N < 0.6$)	38
2.6.3.2	Aliran pusaran kuat ($S_N > 0.6$)	39
2.6.4	Kesan tahap pusaran	40
2.6.5	Fenomena kerosakan vorteks	42
2.6.6	Kejatuhan tekanan	43
2.6.7	Kesan penyelitan plat orifis	46
2.7	Kesimpulan penyelidikan terdahulu	49
3	REKABENTUK PEMUSAR UDARA, KEBUK PEMBAKAR DAN PENYEDIAAN RIG UJIKAJI	
3.1	Pengenalan	53
3.2	Rekabentuk pemusar udara	54
3.3	Rekabentuk kebuk pembakar	57
3.3.1	Zon nyalaan	58
3.3.2	Penentuan panjang dan diameter nyalaan	59
3.4	Nisbah bahan api udara (nisbah kesetaraan, ϕ)	59
3.5	Pekali discas, C_D dan tekanan statik dinding	61
3.6	Sistem ujikaji	65
3.6.1	Sistem bekalan bahan api	65
3.6.2	Sistem suntikan bahan api	66
3.6.3	Sistem bekalan udara	67
3.6.4	Instrumentasi kebuk pembakar	68
3.6.5	Sistem persampelan gas ekzos	68
3.6.6	Sistem penganalisa gas	69
3.7	Prosedur ujian umum	70
4	PEMBAKAR BERPEMUSAR ALIRAN JEJARIAN UNTUK PEMBAKARAN RENDAH NO_x	
4.1	Pengenalan	73
4.2	Kesan penggunaan pemusar aliran jejarian	74

4.2.1	Profil taburan suhu	74
4.2.2	Pengaruh nombor pusar, SN terhadap emisi purata pembakar	76
4.3	Perbandingan pembakaran dengan bahan api berbeza	79
4.3.1	Profil taburan suhu	79
4.3.2	Kesan bahan api terhadap emisi purata pembakar	80
5	PRESTASI PEMBAKAR BERPEMUSAR ALIRAN JEJARIAN : KESAN PENYELITAN ORIFIS	
5.1	Pengenalan	91
5.2	Kesan penyelitan plat orifis pada pemusar aliran jejarian	92
5.2.1	Pengaruh penyelitan orifis terhadap emisi purata pembakar	93
5.2.2	Ulasan pembakaran dengan penyelitan plat orifis	96
6	KESIMPULAN DAN CADANGAN	
6.1	Kesimpulan secara umum	103
6.2	Kesimpulan tentang emisi pembakaran	105
6.3	Cadangan penyelidikan pada masa akan datang	106
	RUJUKAN	108
	LAMPIRAN A – D	117

SENARAI JADUAL

JADUAL	MUKA SURAT
2.1 Had kepekatan emisi dibenarkan bagi industri di Malaysia	13
2.2 Oksida nitrogen	17
3.1 Maklumat lengkap rekabentuk pemusar aliran jejarian	56
3.2 Perbandingan reka bentuk pemusar antara penyelidik terdahulu	57
3.3 Perbandingan nisbah kesetaraan	60
3.4 Komposisi kimia bahan api, diesel dan kerosin komersial	66
3.5 Julat pengesanan dan kejituan penganalisa gas	70

SENARAI RAJAH

RAJAH	MUKA SURAT
2.1 Pengaruh tekanan pembakaran terhadap emisi CO dan UHc	16
2.2 Perkaitan emisi NO enjin dengan suhu masukan pembakar	20
2.3 Perbandingan data NO pada dua aras tekanan	21
2.4 Pengaruh masa mastautin terhadap NO _x dalam sistem bahan api udara pracampur	21
2.5 Gambarajah pembentukan NO menurut mekanisma Fenimore	23
2.6 Ringkasan teknologi pengurangan NO _x	27
2.7 Pengaruh tekanan dan nisbah udara bahan api terhadap emisi NO _x	29
2.8 Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan pusaran	31
2.9 Bentuk aliran pusaran lemah	38
2.10 Taburan jejarian halaju paksi	38
2.11 Bentuk aliran pusaran kuat	39
2.12 Pengaruh sudut dan jenis bilah terhadap pekali kehilangan tekanan	44
2.13 Pengaruh nombor pusar terhadap aliran jisim balikan maksimum	45
2.14 Pengaruh sudut bilah terhadap aliran jisim balikan maksimum	46
3.1 Skema rekabentuk pemusar aliran jejarian	56
3.2 Pemasangan pemusar aliran jejarian pada pembakar	57
3.3 Skema rekabentuk kebuk pembakaran	58
3.4 Jumlah penggunaan udara pembakaran untuk variasi nisbah kesetaraan, ϕ	61

3.5	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar, ujian sejuk	63
3.6	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 45mm plat orifis, ujian sejuk	63
3.7	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 40mm plat orifis, ujian sejuk	64
3.8	Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan 35mm plat orifis, ujian sejuk	64
3.9	Bentuk semburan bahan api pada pelbagai sudut	67
3.10	Skema kuar instrumentasi pada kebuk pembakar	68
3.11	Skema kuar persampelan 'X' gas ekzos	69
3.12	Skema keseluruhan pembakar berbahan api cecair pada skala makmal	72
4.1	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: diesel	83
4.2	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: diesel	83
4.3	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: diesel	84
4.4	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	84
4.5	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	85
4.6	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	85
4.7	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	86
4.8	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel	86
4.9	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: kerosin	87
4.10	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: kerosin	87
4.11	Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: kerosin	88

4.12	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	88
4.13	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	89
4.14	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	89
4.15	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	90
4.16	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)	90
5.1	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis	97
5.2	Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis	98
5.3	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis	98
5.4	Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis	99
5.5	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis	99
5.6	Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis	100
5.7	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis	100
5.8	Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis	101
5.9	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis	101
5.10	Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis	102

SENARAI SIMBOL

L	-	panjang
D	-	diameter
NO _x	-	oksida nitrogen
°C	-	darjah celcius
Pa	-	pascal
kg	-	kilogram
g	-	gram, pecutan graviti
H ₂ O	-	air
m	-	meter
<i>sat.</i>	-	terlarut
J	-	joule
H ₂	-	hidrogen (gas)
CO	-	karbon monoksida
CO ₂	-	karbon dioksida
<i>f/a</i>	-	nisbah bahanapi udara
ϕ	-	nisbah setara
C ₃ H ₈	-	propana
N ₂	-	nitrogen (gas)
O ₂	-	oksigen (gas)
N ₂ O	-	nitrus oksida
<i>a/f</i>	-	nisbah udara bahanapi
kmol	-	kilomol
<i>h_c</i>	-	entalpi pembakaran

H_{prod}	-	entalpi hasil tindakbalas
H_{react}	-	entalpi bahan tindakbalas
\bar{h}_f	-	entalpi pembentukan
C	-	karbon
atm	-	atmosfera
N	-	nitrogen (elemen)
HHV	-	nilai pemanasan tinggi
LHV	-	nilai pemanasan rendah
m	-	jisim
h_{fg}	-	entalpi pemeruapan air
\bar{h}	-	entalpi rasa pada titik tertentu
\bar{h}^o	-	entalpi rasa pada 25°C dan 1 atm
p	-	hasil tindakbalas
r	-	bahan tindakbalas
Q	-	haba
W	-	kerja
N_r	-	bilangan mol bahan tindakbalas
N_p	-	bilangan mol hasil tindakbalas
UHC	-	hidrokarbon tak terbakar
SO _x	-	oksida sulfur
K	-	kelvin
VOC	-	sebatian organik mudah ruap
O ₃	-	ozon
NO ₃	-	nitrogen trioksida
NO	-	nitrik oksida
ppm	-	bahagian per juta
Hz	-	hertz
V	-	volt
N	-	newton
W	-	watt
l	-	liter

s	-	saat
u	-	halaju arus
ρ	-	ketumpatan
p	-	tekanan
z	-	turus
Δh	-	kehilangan turus
E	-	tenaga

SENARAI LAMPIRAN**LAMPIRAN****MUKA SURAT**

A1	Kejatuhan tekanan pemusar	118
A2	Pekali discas	119
B1	Komposisi kimia bahan api (Analisis CHN)	120
B2	Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net})	120
C1	Pengiraan kecekapan pembakaran	121
D1	Reka bentuk pemusar aliran jejarian	123
D2	Reka bentuk pembakar berbahan api cecair	124
D3	Ujikaji pembakaran pemusar aliran jejarian	125

BAB 1

PENGENALAN

Semenjak 150 tahun kebelakangan ini, emisi oksida nitrogen telah meningkat dengan mendadak di persekitaran bumi. Kenaikan emisi ini di dalam atmosfera telah mendatangkan kesan yang buruk sama ada pada ekologi haiwan, tumbuhan dan kesihatan manusia. Sumber utama emisi oksida nitrogen adalah disebabkan oleh pembakaran bahan api fosil dan biojisim. Bermula dengan revolusi industri dan kenaikan jumlah penggunaan kenderaan di jalanraya, penggunaan bahan api fosil bertambah dan meningkatkan lagi kadar emisi oksida ini. Pertambahan industri pengangkutan udara secara pesat juga menambahkan lagi kadar emisi ini terus ke troposfera. Secara umumnya, emisi oksida nitrogen adalah merujuk kepada NO_x yang komponen di dalamnya terdiri daripada NO , NO_2 dan N_2O . Walaupun begitu, emisi nitrik oksida (NO) adalah yang paling ketara kerana lebih 90% daripada NO_x yang terbentuk hasil daripada pembakaran adalah dalam bentuk nitrik oksida. Sementara itu, emisi nitrus oksida (N_2O) terbentuk hasil tindak balas dengan oksigen. Maka, usaha untuk mengurangkan emisi NO_x di dalam atmosfera lebih tertumpu kepada penurunan NO yang terhasil semasa proses pembakaran.

Bab ini terdiri daripada penerangan berkenaan kesan emisi NO_x terhadap alam sekitar dan kesihatan manusia. Bahagian seterusnya adalah tentang kepentingan penyelidikan ini, objektif, skop dan ringkasan penyelidikan diterangkan di akhir bab ini.

1.1 Kesan Buruk Oksida Nitrogen (NO_x)

Penyelidikan berkenaan emisi NO_x telah giat dijalankan disebabkan kesan buruk ke atas kesihatan manusia dan alam sekitar. Emisi dari bahan cemar ini adalah penyebab berlakunya perubahan kepada alam sekitar seperti hujan asid, penipisan ozon, kenaikan suhu bumi dan asbut fotokimia (*photochemical smog*). Sebaliknya nitrus oksida adalah salah satu gas rumah hijau yang menyebabkan kenaikan suhu bumi.

1.2 Kesan Emisi NO_x terhadap alam sekitar

1.2.1 Hujan Asid

Diketahui hujan adalah sumber utama punca pengairan dan juga sumber alam yang amat penting kepada kehidupan sejagat. Hujan yang turun ke bumi sepanjang tahun adakalanya berasid dengan pH kurang 5.6. Secara teori hujan asid sepatutnya bernilai pH menghampiri nilai neutral 7.0 (Kim, 1995). Ini bukanlah keadaan sebenar pada keadaan atmosfera.

Hujan asid ini merupakan masalah setempat. Penyumbang utama kepada hujan asid adalah NO_x dan SO_x. Masalah SO_x boleh dikurangkan dengan mengurangkan kandungan sulfur dalam penghasilan bahan api tersebut. Akibat dari kesan bahan cemar SO_x telah menyumbang kira-kira 60 peratus dan NO_x kira-kira 35 peratus di dalam kandungan hujan yang turun ke bumi (de Nevers, 1995). Bagi hujan bersih yang turun ke bumi tanpa bahan cemar pHnya adalah 5.6. Nilai pH ini diperolehi akibat tindak balas titisan hujan dengan CO₂ di udara.

Kajian yang telah dijalankan di Malaysia oleh Jabatan Alam Sekitar menunjukkan bahawa purata tahunan sulfur dioksida ialah $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ di kawasan rumah berdekatan bandar. Bagi kawasan industri julat kepekatan adalah antara $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hingga $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Afroz, 2002).

Faktor utama dalam penghasilan hujan asid ini ialah oksida dari sulfur dan nitrogen hasil dari proses pembakaran. Hasil keluaran unsur-unsur tersebut biasanya selepas beberapa jam atau beberapa hari lalu akan dibawa oleh angin dan bergabung dengan molekul-molekul air dan membentuk kepulan-kepuluan awan yang dipenuhi dengan asid nitrik dan asid sulfurik. Kepulan-kepuluan awan berasid ini seterusnya akan turun ke bumi sebagai hujan asid (Kim, 1995).

Hujan asid menghasilkan kesan yang buruk terhadap sistem ekologi terutamanya sungai, tasik dan gunung. Pengasidan pada tasik mencapai nilai pH kurang 4.5. Tasik yang berasid memberi kesan buruk terhadap populasi habitat di sekitarnya (Longcore *et al.*, 1993). Ia juga memberi kesan buruk kepada manusia dan tumbuhan kerana air adalah sumber penting kehidupan.

1.2.2 Penipisan Lapisan Ozon

Lapisan ini terletak di stratosfera iaitu pada ketinggian 20 ke 50 ribu meter dari permukaan bumi. Keadaan keseimbangan ozon secara semula jadi di stratosfera ditentukan oleh interaksi yang kompleks antara radiasi matahari, pergerakan '*meteorological*' di dalam stratosfera, pengangkutan dari dan ke troposfera, dan kepekatan unsur yang berdasarkan elemen selain dari oksigen dan yang sampai ke stratosfera secara semulajadi atau tidak (oleh kapal terbang) (Mohd-Jaafar, 1997).

Untuk melihat pembentukan awal ozon dari oksigen pada udara berdasarkan model '*photochemical*' ozon stratosfera dan melihat mekanisme ozon bergantung kepada dua fotokimia dan dua tindak balas kimia iaitu (de Nevers, 1995):



Tindak balas (1.1) dan (1.2), adalah di mana ozon terhasil. Tindak balas (1.3) dan (1.4) membentuk keseimbangan kepekatan ozon di troposfera. Apabila tindak balas (1.3) dan (1.4) dicampurkan, kadar keseluruhan pemusnahan ozon akan diperolehi:



Kadar tindak balas (1.1)–(1.4) berubah terhadap altitud. Kadar malar tindak balas (1.1)–(1.4) dapat ditentukan oleh fluks solar pada altitud yang diberikan dan kadar malar tindak balas lain ditentukan oleh suhu pada altitud tersebut.

Tindak balas rantai pemangkin ini adalah kitar kereaktifan klorin, kitar nitrogen, dan kitar hidrogen atau hidroksil. Pembentukan dan kemusnahan ozon dalam atmosfera perlu seimbang bagi memulihara lapisan ozon yang meneduhi bumi. Walau bagaimanapun, peningkatan kepekatan gas buatan manusia seperti nitrogen oksida dari proses pembakaran dan aktiviti pertanian telah mengakibatkan penipisan ozon dalam tempoh yang cepat berbanding dengan tempoh pembentukannya.

Beberapa kesan akibat daripada penipisan lapisan ozon:

- i. Menyerap ultra ungu dari matahari. Sinaran ultra ungu akan banyak melepasi lapisan ozon akibat dari lapisan ozon yang nipis dan akan mengakibatkan penyakit seperti barah kulit.
- ii. Mengekalkan kepanasan bumi pada paras yang tinggi dan mengakibatkan berlaku beberapa perubahan pada keadaan kitaran seperti berlakunya El Nino dan La Nina.
- iii. Gas rumah hijau bertambah dan keadaan ini amat merbahaya kepada bumi di mana bumi sangat bergantung kepada keseimbangan antara masukan

radiasi solar dan penyiaran sinaran infra merah yang dipancarkan oleh bumi.

1.2.3 Kenaikan Suhu Bumi

Kepanasan bumi atau kesan rumah hijau adalah fenomena yang disifatkan sebagai peningkatan suhu atmosfera. Kesan ini terjadi kerana ketidak seimbangan tenaga di bumi. Cahaya matahari merupakan sumber tenaga utama di bumi. Cahaya matahari dipancar ke bumi dalam bentuk ultraungu, cahaya yang dapat dilihat dan radiasi infra merah di mana mempunyai panjang gelombang kira-kira 0.2 - 4 μm dengan puncaknya 0.6 μm . Jumlah tenaga yang sampai ini akan dipantulkan balik ke angkasa iaitu kira-kira 30 % dan pantulan ini tidak akan menyebabkan kepanasan pada bumi (Mohd-Jaafar, 1997). Radiasi ultra ungu akan menembusi atmosfera bumi dan memantul semula sebagai radiasi infra merah.

Gas-gas rumah hijau memainkan peranan yang penting bagi menyerap radiasi ini. Gas-gas rumah hijau terdiri daripada karbon dioksida, metana, ozon, oksida nitrogen dan kloroflorokarbon (CFC). Gas-gas yang terbentuk di atmosfera terutama sekali gas rumah hijau ini akan diserap dan dipancarkan semula ke bumi sebagai radiasi terma dari permukaan bumi. Bagaimanapun emisi atmosfera kekurangan tenaga untuk menghantar gas ini ke angkasa kerana suhu purata atmosfera adalah sekitar -18°C . Oleh kerana perbezaan tenaga ini, gas ini terperangkap di atmosfera. Proses ini adalah kesan rumah hijau. Bagaimanapun bilamana pemerangkapan tenaga berubah di mana kesan atau peningkatan karbon dioksida tinggi, radiasi terma terperangkap di atmospera bumi. Ini seterusnya akan meningkatkan suhu bumi, tinggi dari yang diperlukan dan boleh merubah keseluruhan suhu maksimum bumi.

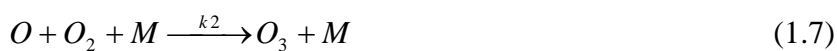
Peningkatan suhu ini menyebabkan ais di kutub utara mencair dan menyebabkan permukaan daratan bumi menjadi seperti kecil. Kesan daripada gandaan karbon dioksida ini akan meningkatkan suhu keseluruhan bumi kira-kira $2 \pm 1\text{K}$. (Mohd-Jaafar, 1997)

1.2.4 Asbut fotokimia (*Photochemical Smog*)

Kesan ini wujud bila tiada pergerakan udara, cahaya matahari yang sangat banyak dan penumpuan hidrokarbon dan nitrogen oksida di dalam atmosfera. Kesan ini selalunya berlaku di bandar-bandar besar. Asbut ini meningkat daripada tindak balas fotokimia di atmosfera yang rendah iaitu hubungan daripada hidrokarbon dan oksida nitrogen yang dilepaskan oleh ekzos kenderaan bermotor dan dari kilang-kilang. Permulaan mekanismanya bermula daripada penyerapan ultra violet dari matahari oleh NO_x . Ini menyebabkan oksida nitrogen terurai kepada oksida nitrik dan mengaktifkan atom-atom oksigen (Mohd-Jaafar, 1997):



Atom-atom oksigen ini akan bergabung dengan molekul oksigen untuk membentuk ozon di mana ia sendiri akan diaktifkan dan bertindak balas sebagai oksida:



Dengan ketiadaan spesis lain, suatu keadaan mantap ozon wujud dipanggil hubungan '*photostationary*':

$$[\text{O}_3] = \frac{k_1[\text{NO}_2]}{k_3[\text{NO}]} \quad (1.9)$$

Dalam keadaan biasa pembentukan ozon akan secara cepat berubah oleh tindak balas NO dan melengkapkan NO_x dan O_2 seperti dalam persamaan di atas. Bagaimanapun di dalam atmosfera hidrokarbon ini akan disingkirkan secara berperingkat sebagai tindak balas NO dengan 'Hidrokarbon Radikal Peroksiakil

(RCO_3)' dan ini akan membuatkan paras ozon berada di tahap bahaya. (Mohd-Jaafar, 1997)

1.3 Kesan NO_x ke atas Kesihatan Manusia dan Haiwan

Emisi oksida nitrogen boleh mendatangkan kesan yang buruk kepada kesihatan manusia dan haiwan. Emisi NO dan NO_2 boleh mengakibatkan penyakit jantung dan paru-paru. Pendedahan kepada emisi NO_2 pada kadar rendah boleh menyebabkan kerosakan fungsi buah pinggang, hati, sel darah merah dan sistem imunisasi badan (Sloss *et al.*, 1992). Selain itu, emisi NO dan NO_2 boleh meningkatkan lagi risiko penyebaran penyakit barah. Terdapat satu kajian secara intensif telah dijalankan di Amerika Syarikat berkenaan peningkatan masalah pernafasan yang berlaku akibat terdedah kepada emisi NO_2 pada kepekatan dari 0.109 hingga 0.062 ppm selama 6 bulan (Shy *et al.*, 1970).

Emisi NO_x juga memberi kesan buruk kepada haiwan. Kematian haiwan boleh berlaku apabila pendedahan terhadap emisi ini pada kepekatan yang tinggi sehingga 100 ppm (US EPA, 1993). Pendedahan jangka pendek pada kepekatan NO_2 yang tidak tinggi boleh mengubah fungsi pulmonari di dalam paru-paru buruk (Henry *et al.*, 1965). Pendedahan pada kadar 15 hingga 50 ppm dalam jangka masa 2 jam boleh mengakibatkan kerosakan pada paru-paru, hati, limpa, buah pinggang pada buruk (US EPA, 1993). Sementara itu, kematian berlaku kerana pendedahan hanya selama 12 minit pada kadar 2500 ppm kepada tikus makmal (Flury dan Zernick, 1931).

1.4 Kepentingan Penyelidikan

Kini, kawalan terhadap emisi NO_x telah menjadi sangat penting kerana kesan-kesan buruk terhadap kesihatan manusia dan alam sekitar seperti yang telah dibincangkan dalam seksyen 1.1. Perkembangan sektor industri telah menjadi penyebab utama pertambahan kepekatan emisi oksida nitrogen NO_x dalam atmosfera. Kesemua proses-proses pembakaran menyumbang kepada pembentukan NO_x . Industri yang menjalankan operasi dandang dan relau adalah penyumbang utama kepada kenaikan emisi ini. Peningkatan secara janzang geometri emisi NO_x adalah satu petanda amaran kepada kesihatan dan keadaan persekitaran. Dengan kadar kenaikan emisi oksida ini, undang-undang yang tegas telah dilaksanakan dan pencemaran daripada sektor yang terlibat berada pada tahap malar untuk tempoh beberapa tahun kebelakangan ini. Maka teknologi pembakaran rendah NO_x adalah sangat penting kepada negara-negara membangun dalam mengurangkan lagi pembebasan gas oksida ini ke atmosfera. Ramai penyelidik-penyelidik adalah diperlukan untuk membangunkan teknologi ini dan seterusnya digunakan di sektor industri.

Dalam mengurangkan emisi NO_x terdapat 2 kaedah yang boleh digunakan untuk mengawal emisi NO_x untuk kegunaan pembakar. Pertama adalah menghalang pembentukan emisi nitrik oksida (NO) dan yang keduanya memushahkan emisi NO daripada hasil pembakaran. Kaedah menghalang pembentukan NO merangkumi perubahan kepada reka bentuk dan operasi pembakar sedia ada. Dalam penyelidikan ini, pembakar direka bentuk dengan memasukkan aliran pusar untuk mempertingkatkan aliran gelora yang mana membantu percampuran antara udara dan bahan api ketika proses penyalaan. Aliran pusar menyebabkan terbentuk zon aliran gelora yang kuat dan akan terbentuk kawasan aliran kitaran semula di dalamnya (Khezzar,1998). Fenomena ini memainkan peranan yang besar dalam proses menstabilkan nyalaan pembakaran dengan menyediakan ruang aliran gas panas bergerak kembali ke kawasan percampuran bahan api dan udara dan membantu pembakaran (Gupta *et. al*, 1984).

Aliran pusat dapat menstabilkan nyalaan pembakaran dan memperbaiki percampuran bahan api dan udara. Nisbah percampuran yang baik dapat mengurangkan zon suhu tinggi dan seterusnya mengurangkan pembentukan NO_x . Sementara itu, kaedah pembakaran agihan udara skunder digunakan untuk memodulkan pembakaran stoikiometri di mana dapat diperhatikan peratusan udara skunder yang digunakan untuk mengawal emisi NO_x dan CO pada pembakar. Sistem ini diperhatikan mempunyai potensi dalam menyelesaikan masalah emisi pembakar sektor industri dalam mematuhi undang-undang sedia ada dan meningkatkan lagi kecekapannya.

1.5 Objektif dan skop penyelidikan

1.5.1 Objektif

Objektif utama penyelidikan ini adalah seperti berikut:

- i. Menyelidik dan memilih kaedah pengurangan emisi secara pra pembakaran dalam mengurangkan pencemaran daripada pembakar berbahan api cecair.
- ii. Mereka bentuk pembakar berbahan api cecair yang menggunakan kaedah yang dipilih.
- iii. Membangunkan prototaip, sebuah pembakar yang mesra alam dan cekap.
- iv. Menguji prestasi pembakar dari aspek pembentukan pencemaran dan kecekapan pembakaran menggunakan kaedah yang dipilih.

1.5.2 Skop Penyelidikan

- i. Mereka bentuk dan membangunkan sebuah pembakar berbahan api cecair pada skala makmal untuk mengkaji kaedah aliran pusar dalam mengurangkan emisi.
- ii. Kajian secara ujikaji prestasi isoterma pembakar menggunakan aliran pusar secara jejarian pada beberapa sudut bilah bagi mendapatkan nombor pusar.
- iii. Mengkaji pembakaran aliran pusar pada bahan api diesel dan kerosin komersil bagi melihat prestasi dari aspek pencemaran dan kecekapan.
- iv. Mengkaji pembakaran dengan penyelitan plat orifis pada bahan api diesel komersil bagi melihat prestasi dari aspek pencemaran dan kecekapan.

1.6 Gariskasar Laporan

Laporan ini terdiri daripada 6 bab yang telah disusun seperti di bawah:

Bab 2 merangkumi kajian literatur berkenaan beberapa keadaan mekanisme pembentukan emisi NO_x , peranan aliran pusar dalam meningkatkan kecekapan pembakaran dan seterusnya mengurangkan pencemaran pada keadaan prapembakaran. Bab 3 adalah penerangan terperinci berkenaan penyediaan rig ujikaji dan prosedur ujikaji. Perbincangan keputusan ujikaji aliran pusar terdapat di bab 4. Sementara itu, bab 5 terdiri daripada perbincangan berkenaan kesan dari segi prestasi pembakar dengan kaedah penyelitan plat orifis. Bab 4 dan 5 juga mengandungi perbandingan keputusan dengan penyelidikan-penyelidikan terdahulu. Akhir sekali, bab 6 iaitu kesimpulan penyelidikan dan pembaikan-pembaikan yang dapat dibuat pada masa yang akan datang dalam penyelidikan ini.

BAB 2

KAJIAN LITERATUR EMISI DAN KAWALAN EMISI DARI PEMBAKAR BERBAHAN API CECAIR DAN FAKTOR AERODINAMIK DALAM SISTEM PEMBAKARAN

Bahagian pertama bab ini adalah penerangan umum tentang emisi daripada pembakaran dalam pelbagai bentuk. Seterusnya diikuti dengan kaedah-kaedah pembentukan emisi tersebut. Bahagian kedua terdiri daripada penerangan umum tentang kaedah-kaedah pengurangan emisi ini di dalam sektor industri dan bahagian ketiga adalah kajian aerodinamik di dalam sistem pembakaran.

2.1 Peraturan dan Akta Pencemaran

Akibat peningkatan kadar pencemaran udara di hampir keseluruhan negara perindustrian, maka timbul kesedaran di kalangan badan-badan kerajaan sedunia untuk bergabung tenaga bagi membentuk undang-undang dan peraturan baru berkenaan emisi dari proses pembakaran. Ini bertujuan untuk mengurangkan masalah pencemaran yang semakin meruncing. Amerika Syarikat dan Jepun adalah antara negara awal yang mengutarakan kebimbangan tentang aras emisi dari proses pembakaran sama ada dari sumber-sumber pegun atau kenderaan bermotor.

Undang-undang persekutuan pertama yang digubal ialah Akta Kawalan Pencemaran Udara pada tahun 1955 (Peraturan Am 84-159, 14 Julai 1955) (Bathie, 1984) menganggap bahawa pencegahan dan kawalan pencemaran udara adalah tanggungjawab kerajaan negeri dan tempatan.

Ini menyebabkan keadaan pencemaran udara di kawasan bandar menjadi semakin kritikal akibat sikap tidak peduli pihak bertanggungjawab yang menuding jari antara satu sama lain dalam mengatasi masalah ini. Pencemaran udara berlaku akibat dari pengeluaran asap yang berlebihan daripada ekzos kenderaan bermotor dan sehubungan itu, akta 1955 telah dipinda kepada Pindaan Akta Kawalan Pencemaran Udara 1960 (peraturan Am 86-493, 6 Jun 1960) dan Pindaan 1962 (Peraturan Am 87-761, 9 Oktober 1962) (Bathie, 1984).

Akta Udara Bersih 1963 (Peraturan Am 88-206, Disember 1963) telah memberikan sumbangan kepada pembangunan kriterium mutu udara manakala Akta Mutu Udara 1967 telah mendorong kepada pengkajian selama dua tahun terhadap konsep piawaian emisi kebangsaan dari sumber-sumber yang menjadi isu kepada pembentukan undang-undang Akta 1970. Peruntukan utama Pindaan Udara Bersih 1970 meliputi (Bathie, 1984):

- i. Setiap negeri mempunyai tanggungjawab utama untuk menentukan mutu udara di keseluruhan kawasan geografi yang mengandungi negeri tersebut.
- ii. Satu keperluan bahawa piawaian mutu udara ambien kebangsaan akan ditubuhkan oleh Agensi Pelindungan Alam Sekitar (EPA).
- iii. Satu keperluan bahawa pihak industri mesti mengawasi dan menyelenggara rekod-rekod emisi dan memberikannya kepada pegawai-pegawai EPA.

Pindaan Udara bersih 1970 memerlukan bahawa piawaian mutu udara ambien kebangsaan ditubuhkan oleh EPA. Pindaan-pindaan ini telah menetapkan had kepekatan maksimum karbon monoksida, hidrokarbon, nitrogen oksida, sulfur oksida, zarah dan pengoksidaan. Pindaan ini juga memerlukan perubahan piawaian emisi pesawat udara. Cadangan-cadangan piawaian emisi terakhir diterbitkan pada 17 Julai 1973 (Bathie, 1984).

Piawaian emisi mula dikuatkuasakan pada tahun 1976 dengan melakukan beberapa perubahan. Antaranya adalah membenarkan pengoperasian industri dengan mengambil kira kemajuan pengetahuan dan teknologi yang dijalankan hasil dari usaha yang kuat oleh kerajaan. Peningkatan kesedaran ini juga telah berkembang sehingga ke negara-negara lain di dunia iaitu Eropah dan United kingdom. Disebabkan oleh kesedaran inilah United kingdom telah mengubal Akta Pelindungan Alam Sekitar dengan harapan agar masalah pencemaran ini boleh dikurangkan dan dengan ini keselamatan penduduk dan harta benda adalah terjamin.

Sementara itu Jadual 2.1 menunjukkan ringkasan Akta Kualiti Alam Sekitar Malaysia (Akta dan Peraturan Kualiti Alam Sekitar (Udara Bersih), 1974) untuk pelepasan bahan cemar bagi industri. Akta ini telah menetapkan had kepekatan maksimum karbon monoksida (CO), hidrokarbon (Hc), nitrogen oksida (NO_x), sulfur oksida (SO₂), zarah atau partikel.

Jadual 2.1 Had Kepekatan Emisi Dibenarkan Bagi Industri Di Malaysia
(Akta dan Peraturan Kualiti Alam Sekitar (Udara Bersih), 1974)

Emisi	Purata masa (jam)	Had (ppm)	Had (mg/m ³)
Ozon	1 jam	0.10	200
	8 jam	0.06	120
CO	1 jam	30.0	35
	8 jam	9.0	10
NO ₂	1 jam	0.17	0.32
SO ₂	1 jam	0.13	0.35
	24 jam	0.04	0.105
NO _x			2.0 g dari SO ₃ /m ³
Asid sulfurik bergas (SO ₃)			200

2.2 Emisi dari Pembakar

Secara umumnya terdapat empat bahan cemar utama yang terhasil daripada proses pembakaran. Bahan cemar tersebut adalah karbon monoksida (CO), hidrokarbon tak terbakar (UHC) dan akhir sekali oksida nitrogen (NO_x). Sulfur dioksida (SO₂) sebagai hasil pembakaran jika bahan api yang digunakan mengandungi unsur sulfur. Kesemua bahan cemar ini mendatangkan kesan buruk kepada alam sekitar dan kepada kesihatan manusia.

2.2.1 Karbon Monoksida (CO)

Karbon monoksida, merupakan satu gas yang tidak berwarna, berasa ataupun berbau. CO boleh memberi kesan terhadap sifat-sifat bahan, tumbuhan dan manusia. CO boleh mengakibatkan kesan buruk terhadap '*aerobic metabolism*' manusia, di mana ia boleh menghalang fungsi sel-sel darah merah dalam pemindahan oksigen (Escott, 1993).

Karbon monoksida terhasil dalam jumlah yang banyak pada semua nisbah bahan api udara dan sejumlah besar juga akan dibentuk akibat kekurangan oksigen dalam pembakaran untuk melengkapkan tindak balas kepada CO₂. Pada nisbah bahan api udara yang rendah, suhu selalunya adalah terlalu rendah untuk membentuk CO₂. Pada nisbah bahan api udara zon utama yang tinggi, CO terbakar dengan cepat kepada keadaan keseimbangan, yang mana adalah lebih tinggi daripada nilai piawai emisi yang dibenarkan. Pencampuran udara bahan api yang tidak mencukupi, menghasilkan suatu kawasan di mana kekuatan campuran yang terlalu rendah untuk menampung pembakaran, dan kawasan di mana pembakaran yang lampau kaya menghasilkan kepekatan CO tempatan yang tinggi.

Tindak balas yang pantas antara hidrokarbon daripada bahan api dan udara di dalam pembakaran menghasilkan emisi CO. Tindak balas pantas ini, akan menghasilkan sebatian CH_2O dan CHO dan tindak balas selanjutnya secara radikal menghasilkan CO (Escott, 1993)



Aras emisi CO dapat diminimumkan dengan melengkapkan pengoksidaan dan membentuk karbon dioksida (CO_2). Faktor yang membolehkan keadaan ini berlaku ialah suhu yang tinggi, kepekatan oksigen tinggi, tekanan yang tinggi dan masa pembakaran yang panjang (Mellor, 1976). Mekanisma pengoksidaan sebatian CO adalah seperti di bawah:



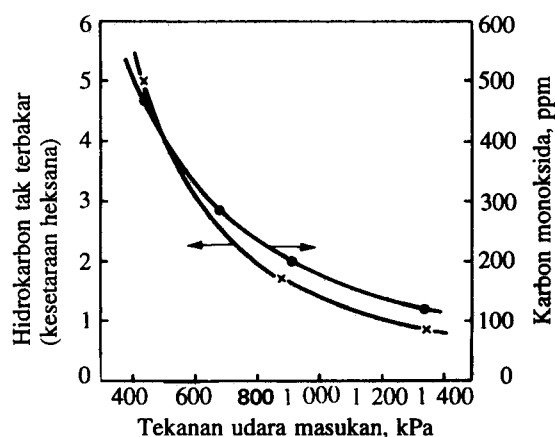
Beberapa pendekatan yang dapat dilakukan dalam pengurangan CO adalah (Lefebvre, 1983):

- i. Kadar pembakaran yang sempurna di dalam zon utama di samping nisbah bahan api yang optimum dengan tempoh mastautin yang mencukupi.
- ii. Mengawal percampuran bahan api dengan udara pada suatu keadaan yang dikehendaki.
- iii. Jujuhan udara termampat. Ini termasuklah menjujuhkan udara daripada pemampat semasa kendalian udara rendah. Ia dapat mengurangkan emisi CO dan menambahkan nisbah bahan api udara dan suhu di dalam zon utama.

2.2.2 Hidrokarbon Tak Terbakar (UHC)

Hidrokarbon terhasil dari pembakaran yang tidak lengkap. Pembebasan hidrokarbon berlaku pada nisbah bahan api udara kaya dan terhasil dalam dua bentuk iaitu titisan atau wap (Lefebvre, 1983). Paras hidrokarbon dalam gas ekzos umumnya diukur dalam bentuk jumlah kepekatan hidrokarbon dan dinyatakan dalam bahagian per juta (ppm). Campuran udara bahan api memainkan peranan penting dalam pembebasan hidrokarbon, kerana pencampuran yang tidak lengkap menyebabkan bahan api tidak terbakar dengan lengkap dan keluar bersama-sama gas ekzos ke atmosfera.

Antara kaedah yang dapat mengurangkan emisi UHC adalah dengan pembaikan pengabusan bahan api dan melalui kesan tekanan dan suhu udara masukan yang tinggi (Fletcher dan Lefebvre, 1976). Pembaikan ini akan menghasilkan titisan bahan api yang lebih kecil, dengan titisan yang kecil ini bahan api mudah terbakar dan sama-sama akan meningkatkan kadar tindak balas kimia dalam zon pembakaran. Menyalurkan udara tambahan juga dapat memperbaiki prestasi pembakaran dan dapat mengurangkan UHC (Lefebvre, 1983).



Rajah 2.1 Pengaruh tekanan pembakaran terhadap emisi CO dan UHC (Bahr, 1973).

Faktor yang mengawal emisi CO juga mempengaruhi UHc. Oleh itu, emisi CO dan UHc cenderung mengikut bentuk yang sama. Bahr (Bahr, 1973) telah mengkaji wujudnya perkaitan antara emisi CO dan UHc. Rajah 2.1 menunjukkan perkaitan yang hampir di antara CO dan UHc

2.3 Emisi Oksida Nitrogen, NO_x

Sebatian oksida nitrogen yang paling ketara pada aras emisi yang tinggi ialah nitrik oksida. Emisi ini adalah dominan dalam keluarga oksida nitrogen. Oksida ini dihasilkan melalui pengoksidaan nitrogen atmosfera dalam kawasan nyalaan suhu tinggi. Selain daripada itu, terdapat juga di dalam keluarga ini dinitrogen trioksida, nitrogen tetraoksida dan nitrogen pentaoksida yang wujud dalam kuantiti yang amat kecil. Ringkasan keluarga oksida nitrogen dan sifat-sifatnya dapat dilihat dalam Jadual 2.2.

Jadual 2.2 Oksida Nitrogen (Miller dan Bowman, 1989)

Oksida	Formula	Elektro valens nitrogen	Sifat bahan
Nitrus oksida	N ₂ O	1	Gas stabil, tidak berwarna dan larut air
Nitrik oksida	NO	2	Gas stabil, kadar larut air yang rendah, tidak berwarna
Dinitrogen dioksida	N ₂ O ₂		
Dinitrogen trioksida	N ₂ O ₃	3	Larut air
Nitrogen dioksida	NO ₂	4	Gas stabil, warna merah keperangan, kadar larut air tinggi
Nitrogen tetraoksida	N ₂ O ₄		
Nitrogen pentaoksida	N ₂ O ₅	5	Tidak stabil, kadar larut air tinggi

2.3.1 Faktor kimia dalam pembentukan NO_x

Pembangunan teknologi pembakaran rendah NO_x adalah berasaskan konsep bahawa oksida ini terbentuk semasa proses pembakaran. Maka, ini memerlukan kajian berkenaan mekanisma kimia pembentukan oksida nitrogen. Bahagian seterusnya adalah ringkasan penting tentang 2 mekanisma tindakan pembentukan secara kaedah kimia oksida nitrogen daripada gas nitrogen di dalam udara. Mekanisma ini ialah mekanisma Zeldovich atau pembentukan secara terma dan mekanisma Fenimore. Mekanisma-mekanisma ini secara kumulatifnya menyumbang kepada jumlah emisi NO_x di udara. Mekanisma Zeldovich memberi kesan yang besar pada suhu tinggi dan di dalam zon pasca pembakaran di lingkungan nisbah setara yang besar. Sementara itu, mekanisma Fenimore sangat penting terutamanya dalam keadaan pembakaran kaya bahan api dan pada zon nyalaan hadapan (Bowman, 1992).

2.3.2 Mekanisma Zeldovich

Mekanisma Zeldovich atau mekanisma laluan haba menyumbang kepada terma NO_x di mana pembentukannya adalah seperti tindak balas di bawah :



Dalam proses pembakaran, di mana pembakaran berlaku pada kadar rendah, tindakan ketiga (2.9c) menjadi penting (Miller and Bowman, 1989). Tindakan ini adalah lanjutan kepada mekanisma Zeldovich. NO_x haba yang terbentuk berdasarkan lanjutan mekanisma ini adalah seperti di bawah.



Kadar pembentukan NO_x haba dapat dinyatakan dalam bentuk:

$$K_f = AT^\beta \cdot \exp(-E_A/RT) \quad (2.8)$$

dengan,

$$K_{1f} = 1.8 \times 10^{11} \cdot \exp(-38370/T(K)) \quad (2.9a)$$

$$K_{2f} = 1.8 \times 10^7 \cdot T \cdot \exp(-4680/T(K)) \quad (2.9b)$$

$$K_{3f} = 7.1 \times 10^{11} \cdot \exp(-450/T(K)) \quad (2.9c)$$

Kadar (K_f) dinyatakan dalam nilai $\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{s}$. Sementara itu, R mewakili pekali gas semesta, $R = 8.314 \text{ kJ/K}\cdot\text{mol K}$ dan E_A adalah tindak balas pengaktifan tenaga. Bagi tindak balas (2.5), nilai E_A adalah 31.9 MJ/Kmol , di mana nilai ini agak tinggi dan amat bergantung kepada suhu tindak balas tinggi. Lazimnya, sumbangan mekanisma ini kepada penghasilan NO_x haba menjadi sangat penting pada suhu melebihi 1800K .

Dalam sistem amalan, suhu adalah bersandar kepada nisbah kesetaraan dan pembentukan NO didapati memuncak pada sebelah stoikiometri yang cair bahan api. Ini merupakan persaingan di antara bahan api dengan nitrogen untuk mendapatkan oksigen yang boleh sedia. Walaupun suhu sistem adalah maksimum pada atau keadaan stoikiometri kaya, oksigen yang boleh didapati digunakan sepenuhnya oleh bahan api (disebabkan oleh kadar tindak balas buang haba bahan api oksigen yang lebih tinggi). Pada nisbah setara kurang dari sekitar 0.8, kejatuhan suhu adalah terlampau besar sehingga meluputkan kesan pertambahan kepekatan oksigen bebas, dan aras NO mulai turun (Lefebvre, 1983).

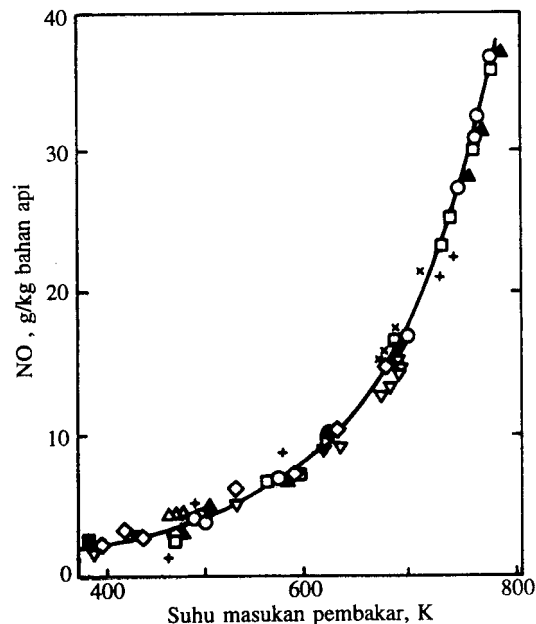
Lipfert (1972) telah membuktikan dengan jelas perkaitan yang kuat di antara emisi NO_x dan suhu untuk sebilangan besar enjin. Rajah 2.2 menunjukkan perkaitan ini. Beliau mendasarkan perkaitannya ini pada suhu masukan pembakar yang mana adalah penting kerana bahagian ini mempengaruhi suhu nyalaan. Roffe dan Venkataramani (1975) mengkaji pengaruh suhu dan tekanan pembakaran terhadap

emisi NO_x menggunakan campuran propana-udara. Hasil ujikaji mereka selaras dengan ungkapan berikut:

$$\ln \frac{\text{NO}_{EI}}{t} = -72.28 + 2.80\sqrt{T} - \frac{T}{38} \quad (2.10)$$

dengan T = suhu nyalaan adiabatik, K
 t = tempoh mastautin pembakar, ms

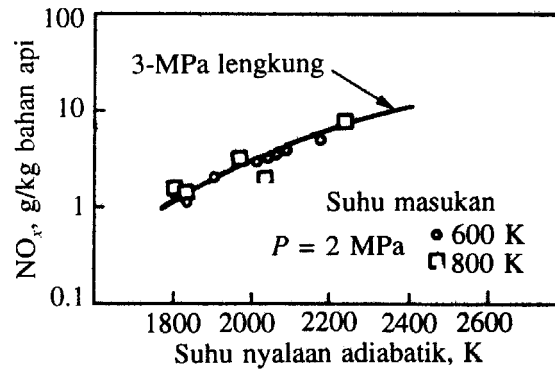
Mereka mendapati tiada pengaruh tekanan bagi julat dari 0.5 hingga 3 MPa, seperti yang ditunjukkan pada Rajah 2.3.



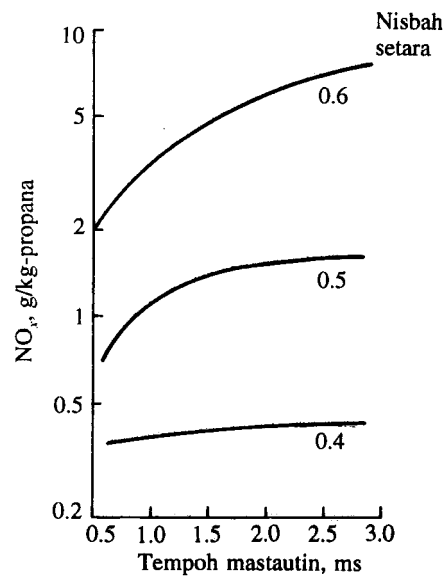
Rajah 2.2 Perkaitan emisi NO enjin dengan suhu masukan pembakar (Lipfert, 1972).

Anderson (1975) dengan menggunakan pembakar pracampur-prawap yang dibekalkan dengan bahan api propana bergas telah mengkaji pengaruh tempoh mastautin terhadap emisi NO_x dan telah diplot dalam Rajah 2.4. Hasilnya menunjukkan emisi oksida bertambah dengan pertambahan tempoh mastautin kecuali untuk campuran yang amat cair bahan api ($\phi \approx 0.4$), yang kadar pembentukan

pada keadaan ini amat perlahan dan mengakibatkan ia menjadi tidak peka terhadap masa.



Rajah 2.3 Perbandingan data NO pada dua aras tekanan (Roffe dan Venkataramani, 1975).



Rajah 2.4 Pengaruh masa mastautin terhadap NO_x dalam sistem bahan api udara pracampur (Anderson, 1975).

2.3.3 Mekanisma Fenimore

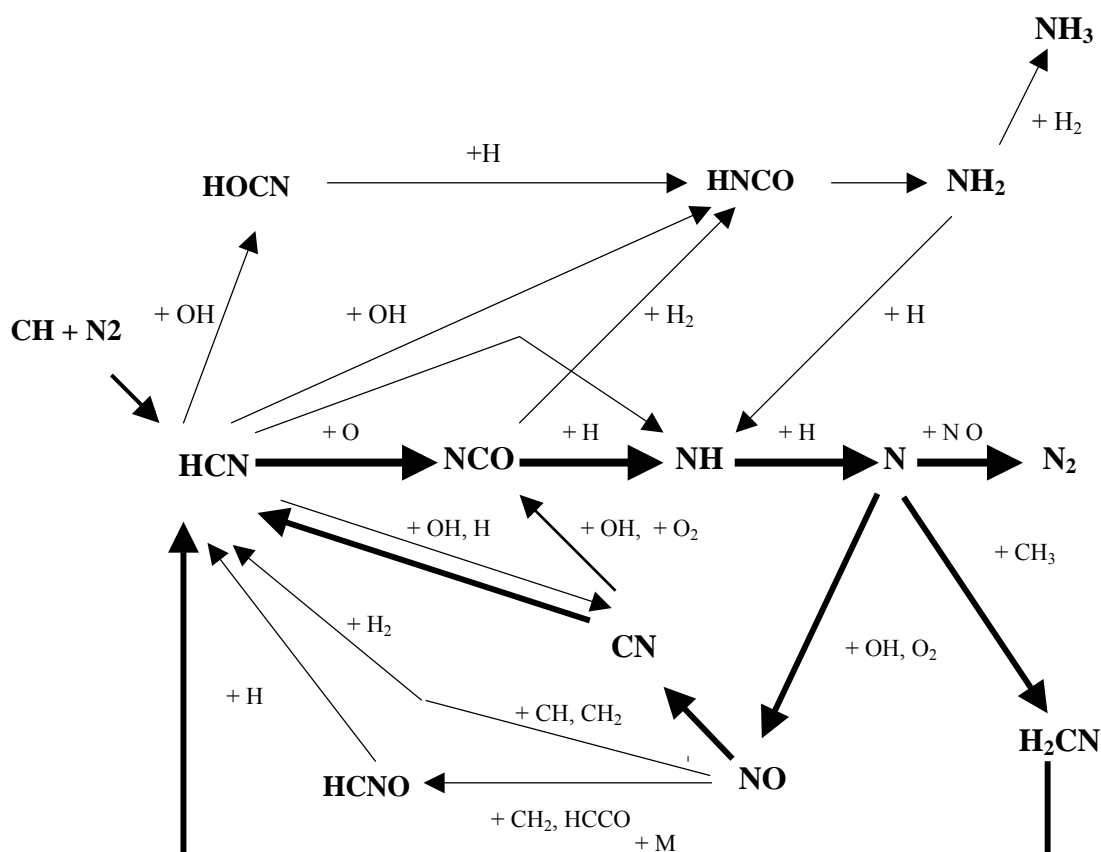
Pembentukan NO_x penggesa adalah berasaskan kepada mekanisme Fenimore. NO_x penggesa dihasilkan melalui tindak balas halaju tinggi pada bahagian depan nyalaan (Fenimore, 1970). Pembentukan ini diperhatikan berlaku dengan pantas sebelum terbentuknya NO_x haba. Oleh sebab itu, tindak balas ini telah dipostulatkan sebagai mekanisme alternatif yang wujud disebalik mekanisme Zeldovich. NO_x penggesa berlaku disebabkan saling tindakan unsur O dan OH yang radikal (Miller dan Bowman, 1989; Miyauchi *et al.* 1976). Walau bagaimanapun, pembentukan NO_x penggesa di dalam nyalaan hidrokarbon adalah tindak balas yang cepat daripada hidrokarbon radikal dengan molekul nitrogen. (Miller dan Bowman, 1989; Heberling, 1976). Daripada keputusan ujikaji, didapati lebih daripada 90% NO_x penggesa terbentuk daripada laluan HCN radikal. Kepentingan unsur HCN di dalam pembentukan NO_x penggesa bergantung kepada jenis bahan api yang digunakan (De Soete, 1974). Dalam mekanisme Fenimore, hidrokarbon radikal bertindak balas dengan N_2 bagi membentuk molekul CN, NH, H_2CN dan HCN, dan seterusnya memulakan tindak balas berantai yang membawa kepada pembentukan NO_x (Iverach, 1973). Sumber CH radikal lazimnya bergantung kepada tindak balas antara $\text{CH}_2 + \text{OH}$ or $\text{CH}_2 + \text{O}$. Sebatian CH_2 adalah berasal sama ada daripada *methyl* atau *acetylene* (Miller dan Bowman, 1989). Mekanisma ini dapat ditulis seperti di bawah (rujuk Rajah 2.5):



Dan seterusnya bergantung kepada nisbah kesetaraan :



Pada nisbah kesetaraan lebih daripada 1.2, kimia pembentukan NO_x menjadi bertambah rumit (rujuk Rajah 2.5). Kadar tindak balas persamaan 2.11 adalah dominan dalam pembentukan NO_x penggesa (Miller dan Bowman, 1989; Dean *et al.*, 1990; Lindackers *et al.*, 1990). Tindak balas ini juga merupakan kadar penghad untuk tindak balas pembentukan NO , HCN (Miller dan Bowman, 1989).



Rajah 2.5 Rajah pembentukan NO menurut mekanisma Fenimore. Garisan tebal menunjukkan tindak balas yang penting (Miller dan Bowman, 1989).

2.3.4 Pembentukan NO_x Bahan Api

Pembentukan NO_x bahan api adalah disebabkan kandungan nitrogen yang wujud di dalam bahan api yang digunakan semasa proses pembakaran. Jumlah kandungan nitrogen ini berbeza dan bergantung kepada jenis bahan api. Nilai tipikal yang diberikan oleh Bowman (Bowman, 1992) adalah seperti di bawah :

<u>Jenis Bahan Api</u>	<u>Jumlah Nitrogen</u>
Arang dan bahan api berasas arang	1.3% (dari jisim)
Minyak mentah	0.65%
Minyak berat	1.44%
Minyak ringan	0.07%

Bahan api petroleum cecair juga mengandungi sebatian organik-nitrogen seperti indola, karbazola, piridina dan quiolina dan apa yang disebut sebatian bahan api-nitrogen (Williams, 1990). Nitrik oksida juga boleh dihasilkan secara tidak lansung daripada sebatian ini. Bukan semua bahan api-nitrogen ditukarkan menjadi NO, malahan sesetengahnya menghasilkan nitrogen. Penghasilan NO dan N₂ bergantung kepada nitrogen di dalam minyak. Kepekatan rendah (<0.05% berat), pertukaran ke NO cuma sekitar 50% (Williams, 1990). Tidak seperti NO_x haba, pembentukan NO daripada bahan api tidak sensitif kepada suhu nyalaan dan kecekapan pembentukan meningkat selaras dengan peningkatan pengoksidaan di dalam pembakaran (Sarofim dan Flagan, 1976). Selain itu, pembentukan NO bahan api pada ketika pembakaran cair bahan api, meningkat jika kecekapan pengabusan atau percampuran udara bahan api meningkat (Sarofim dan Flagan, 1976). Walaupun begitu Pershing dan rakan-rakan (1978) mendapati NO bahan api tidak sensitif kepada saiz titisan bahan api.

Namun demikian, pembentukan NO meningkat dengan peningkatan jumlah kandungan bahan api-nitrogen tetapi kecekapan penukaran akan menurun (Miller dan Bowman, 1989; Fenimore, 1972), dan mereka mencadangkan kaedah pengurangan

yang berkesan adalah pembakaran di keadaan kaya bahan api. Walaupun begitu, pembentukan NO_x bahan api menjadi pembentukan penting jika pembakaran lengkap berlaku pada suhu rendah seperti di dalam pembakaran lapisan terbendalir dan bahan apinya kaya dengan nitrogen (Sarofim dan Flagan, 1976).

2.3.5 Pembentukan NO_x di dalam Sistem Praktikal

Dalam sistem praktikal seperti pembakar industri, enjin diesel atau pembakar turbin gas, emisi NO_x berasal daripada kesemua mekanisma yang telah dibincangkan dalam bahagian sebelum ini. Pembentukan emisi NO_x dapat dilihat pada pembakaran pra-campur dan tiada pra-campur.

2.3.5.1 Pembentukan NO_x di dalam pembakaran pra-campur

Di dalam pembakaran pra-campur, bahan api dan udara bercampur sebatu sebelum nyalaan. Di dalam keadaan ini, suhu puncak pembakaran bergantung kepada nisbah kesetaraan keseluruhan keadaan pembakaran. Walaupun di dalam pembakaran cair bahan api dan bersuhu rendah, pembentukan NO_x masih dapat dilihat. Pada ketika ini, pembentukan nitrus oksida (N_2O) menjadi penting dan sumber utama kepada pembentukan NO_x . Ketika ini juga kenaikan tekanan menghampiri 5 bar akan meningkatkan pembentukan emisi oksida ini (Miichaud *et al.*, 1992). Pada keadaan stoikiometri pula, dengan peningkatan suhu nyalaan, NO haba menjadi sumber utama pembentukan NO_x . Walaupun pun begitu, keadaan ini bergantung kepada kebolehdapatan oksigen di dalam pembakaran dan seringkali suhu maksimum pembakaran berlaku dalam lingkungan 0.7 –0.8 nisbah kesetaraan (Lefebvre, 1983). Sebaliknya, mekanisma Fenimore menjadi tidak penting dalam

pembentukan NO_x pada pembakaran cair bahan api, dan hanya memainkan peranan besar jika pembakaran berlaku dalam keadaan kaya bahan api (Bowman, 1992).

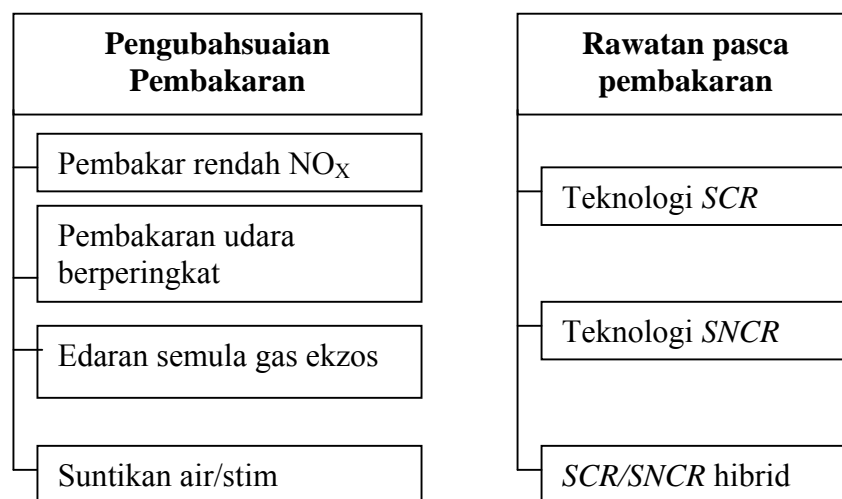
2.3.5.2 Pembentukan NO_x di dalam pembakaran tiada pra-campur

Di dalam pembakaran tiada pra-campur, udara dan bahan api bertindak balas selepas bercampur. Ini bermakna dalam pembakaran bahan api cecair, sifat pembakaran seperti kadar pengabusan dan parameter lain seperti taburan saiz titisan, sudut semburan dan corak semburan menjadi penting. Pembentukan NO_x di dalam nyalaan semburan melibatkan gas laluan. Laluan pertama ialah laluan haba yang telah cukup mantap atau dinamakan laluan mekanisma Zeldovich. Yang kedua melibatkan tindak balas titisan bahan api hidrokarbon dengan molekul nitrogen atau dinamakan NO_x penggesa. Sejumlah besar kuantiti NO_x yang terdapat dalam pembakaran semburan adalah dihasilkan oleh nyalaan yang mengelilingi titisan-titisan individu. Pada titisan tunggal, pengeluaran NO sangat bergantung kepada garis pusat titisan. Oleh itu, sifat-sifat keseluruhan semburan di atas sangat memberi kesan.

Di dalam pembakaran tiada pra-campur pembakaran biasanya berlaku dalam keadaan kaya bahan api, iaitu di sekeliling titisan sedang memeluwap (Williams, 1990). Dalam keadaan ini, sejumlah nitrik oksida dihasilkan melalui laluan mekanisma Fenimore. Karbon yang mengandungi radian bebas bertindak dengan molekul nitrogen untuk membentuk lebih daripada 50% daripada pembentukan keseluruhan NO_x di dalam pembakaran jenis ini (Bowman, 1992).

2.4 Pendekatan untuk mereka bentuk pembakar beremisi rendah

Peraturan yang ketat tentang pelepasan gas oksida nitrogen (NO_x) ke udara membawa kepada pembangunan pelbagai reka bentuk pembakar yang menggunakan pelbagai teknik atau kaedah pengurangan NO_x . Kaedah-kaedah yang digunakan dalam mereka bentuk pembakar dapat dibahagikan kepada dua jenis. Pertama pengubahsuaian kaedah pembakaran dan yang kedua rawatan pada pasca-pembakaran. Pengubahsuaian kaedah pembakaran mengurangkan penghasilan NO_x dengan mengubah suhu puncak nyalaan, nisbah kesetaraan dan percampuran udara bahan api. Sementara itu, teknologi pengurangan emisi pada pasca-pembakaran adalah berkenaan rawatan gas ekzos sebelum terlepas ke atmosfera dengan tidak mengubahsuaikan kaedah pembakaran. Penggunaan kaedah-kaedah ini walaupun dapat mengurangkan emisi tetapi perlu disesuaikan dengan kegunaan pembakar, prestasi yang diinginkan dan kos yang diperlukan untuk membina dan menyelenggara peralatan yang diperlukan.



Rajah 2.6 Ringkasan teknologi pengurangan NO_x

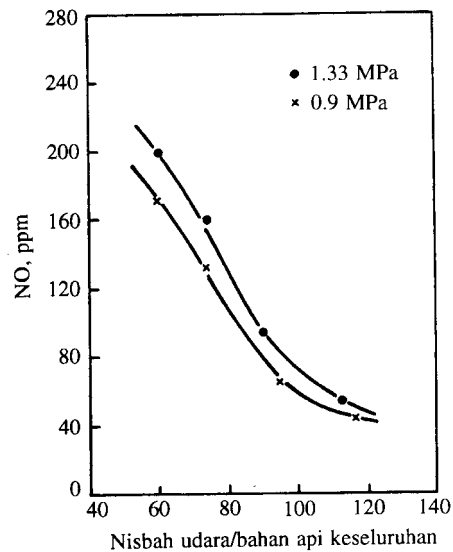
2.5 Pengubahsuaian proses pembakaran

Strategi kawalan proses pembakaran terbahagi kepada tiga bahagian ; a) pengurangan zon suhu tinggi pembakaran, b) pengurangan masa mastautin pada suhu tinggi dan, c) mengurangkan kepekatan oksigen pada zon pembakaran. Pengubahsuaian ini hanya dapat diperolehi dengan mengubah proses pembakaran seperti zon utama yang cair, zon utama yang kaya, pembakaran berperingkat, edaran semula gas ekzos dan suntikan air atau stim. Proses-proses pengubahsuaian di atas mampu mengurangkan pembentukan emisi NO_x dalam lingkungan 50 hingga 80% (Bowman, 1992). Walaupun begitu pengubahsuaian ini bergantung kepada bentuk susunan pembakar dan bahan api yang digunakan.

2.5.1 Pembakar rendah NO_x

Pembakar rendah NO_x direka bentuk untuk mengurangkan pembentukan NO_x dengan mengurangkan suhu puncak nyalaan dan kepekatan oksigen di dalam pembakaran. Sistem pada pembakar ini dapat memperbaiki proses percampuran bahan api udara dan mengekalkan saiz dan susunatur umumnya yang asal. Ini bermakna pembaikan yang dilakukan tidak terkeluar jauh dari sempadan teknologi. Pendekatan praktik bagi pengurangan NO_x dalam pembakar ini adalah seperti berikut:

- i. Zon utama yang cair. Pembakar ini direka bentuk untuk zon utama dikendalikan pada atau melebihi kekuatan campuran stoikiometri, untuk meminimumkan saiz pembakar dan dapat membantu pencucuhan (Lefebvre, 1983). Penambahan udara lebih untuk mengurangkan suhu nyalaan akan menyebabkan pengurangan ketara dalam penghasilan NO_x seperti ditunjukkan dalam Rajah 2.7 (Norster dan Lefebvre, 1972).



Rajah 2.7 Pengaruh tekanan dan nisbah udara bahan api terhadap emisi NO_x (Norster dan Lefebvre, 1972).

- ii. Zon utama yang kaya. Bahan api yang berlebihan akan menghasilkan suhu nyalaan yang lebih rendah, dan dengan itu dapat mengurangkan pembentukan emisi NO_x (Lefebvre, 1983).
- iii. Pembakaran yang lebih homogen. Pembaikan dalam percampuran sebelum proses pembakaran melalui pengabusan dan perletakan bahan api yang baik, mengurangkan julat suhu nyalaan. Jika kaedah ini dijalankan semasa nisbah purata bahan api udara adalah stoikiometri, penghasilan NO_x akan meningkat, tetapi jika digandingkan dengan pembakaran yang cair, emisi NO_x dapat dikurangkan dengan banyaknya (Lefebvre, 1983).
- iv. Pengurangan masa mastautin. Emisi NO_x boleh dikurangkan dengan memendekkan masa gas berada pada suhu tinggi (Anderson, 1975).
- v. Pancitan air atau stim. Oleh kerana pembentukan emisi NO_x bersandar kepada suhu, pencairan campuran bahan api udara bersama dengan bahan yang lengai atau tak terbakar akan mengurangkan pembentukan NO_x (Lefebvre, 1983). Pancitan air telah ditunjukkan oleh Lefebvre dan Durrant (1960) bahawa

pengurangan NO_x yang tinggi boleh dicapai melalui pancitan terus air yang diabus dengan baik, pada kadar aliran sebanyak 0.5 hingga 2.0 kali aliran bahan api ke zon utama pembakaran.

- vi. Edaran semula gas ekzos. Kaedah ini menggunakan bahan lengai yang diperolehi daripada hasil pembakaran. Gas hasil daripada pembakaran akan dikitar semula dan disuap kembali ke zon utama pembakaran untuk mengurangkan suhu pembakaran. Untuk meningkatkan keberkesanan, gas ini perlu disejukkan sebelum dikitar semula. Kaedah ini bukanlah kaedah utama pada pembakar bahan api cecair tetapi sering digunakan pada enjin pembakaran dalam (Masataka, 2000). Penggunaan kaedah ini telah mengurangkan penghasilan emisi NO_x tetapi meningkatkan emisi CO sebagai hasil pembakaran (Lefebvre, 1983).

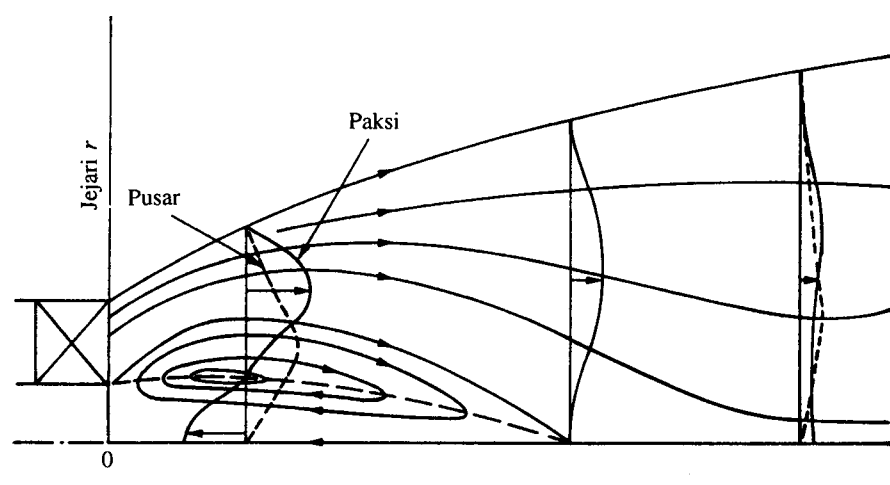
2.6 Penggunaan aliran pusar dan kesan pusaran dalam pembakaran

Menurut Escott (1993), aliran pusar adalah hasil daripada pusaran ataupun komponen halaju tangen yang diberikan kepada aliran dengan menggunakan penjana pusaran. Pusaran digunakan dengan meluas di dalam kebanyakan aplikasi perindustrian seperti pembakar turbin gas dan relau. Dalam sistem pembakaran yang berterusan seperti turbin gas dan relau, nyalaan mestilah pendek dan berkeamatan tinggi supaya dapat mencapai pembebasan haba maksimum dengan pantas. Nyalaan yang panjang dan nyalaan berwarna kuning kebiasaannya menunjukkan nisbah pencampuran udara bahan api yang kurang. Keadaan ini akan menyumbang kepada pembentukan lebih banyak pencemaran karbon monoksida dan hidrokarbon tak terbakar. Sebagai tambahan, dalam nyalaan berwarna kuning, di mana terdapat rantau kaya dengan suhu yang tidak seragam di sepanjang nyalaan dan akan meningkatkan kesan pembentukan oksida nitrogen, NO_x .

Menurut Beer dan Chigier (1972) pula, pusaran jet digunakan untuk mengawal nyalaan dalam kebuk pembakaran dan dalam pelbagai jenis pengering

semburan dan penulu. Keadaan aerodinamik bagi pusaran gelora jet menggabungkan ciri-ciri bagi gerakan putaran dan fenomena gelora bebas yang didapati dalam aliran jet dan olakan.

Apabila gerakan putaran dikenakan kepada aliran bendalir bagi satu orifis, aliran bendalir yang terhasil daripada orifis mempunyai satu komponen halaju tangen sebagai tambahan kepada komponen halaju paksi dan jejarian yang didapati dalam jet bukan pusaran. Apabila udara dimasukkan secara bertangen ke dalam penulu, ianya akan dipaksa berubah arah. Maka akan membentuk aliran berbentuk pilin. Keseimbangan akan terbentuk di antara daya empar yang bertindak ke atas partikel bendalir dan daya tekanan yang dikenakan ke atas dinding tiub. Daya yang seimbang ditunjukkan dengan pengukuran pengagihan tekanan statik dalam sebuah penulu. Tekanan rendah di bahagian pusat teras bagi aliran berputar distabilkan apabila jet terhasil daripada penulu. Maka, pada darjah pusaran yang tinggi aliran akan berbalik arah dan satu vorteks '*torroidal*' pusat akan terbentuk. Garis arus bagi aliran dalam rantau vorteks ini ditunjukkan seperti dalam Rajah 2.8 di bawah.



Rajah 2.8 Susuk biasa komponen halaju paksi dan pusar dalam medan pusaran (Beer dan Chigier, 1972).

Kewujudan vorteks '*torroidal*' menyebabkan sempadan luar bagi jet mengembang dengan pantas sejeurus selepas jet terbentuk daripada keluaran penulu. Pengembangan awal ini tidak dihubungkan dengan iringan bagi udara dan persekitaran. Panjang teras vorteks '*torroidal*' yang dikenalpasti melalui jarak

daripada keluaran penulu ke titik bagi arah aliran balikan akan bertambah dengan pertambahan dalam darjah pusaran. Partikel bendalir yang terhasil daripada penulu boleh dianggap untuk dibebaskan dari daya kekangan yang dikenakan oleh dinding bagi penulu. Keadaan ini akan cenderung untuk pergerakan partikel bendalir secara bertangen.

2.6.1 Kesan-kesan Utama Aliran Pesar

Aliran pesar biasanya digunakan untuk menstabilkan sistem pembakaran berkeamatan tinggi. Kesan utama pusaran adalah seperti berikut:

- i. Untuk mengurangkan jarak panjang api pembakaran dengan menghasilkan kadar iringan bagi bendalir persekitaran yang tinggi dan percampuran yang pantas berhampiran nozel keluar dan pada sempadan kawasan edaran semula.
- ii. Untuk meningkatkan kestabilan nyalaan disebabkan pembentukan kawasan edaran semula dalam kawasan pusaran yang kuat.
- iii. Penyekat berbentuk aerodinamik menyebabkan kesan nyalaan ke atas penulu dapat dikurangkan untuk memastikan penyelenggaraan yang minimum dan memanjangkan hayat unit pembakar.

Kawasan edaran semula iaitu kawasan di mana haba dan spesis kimia aktif diedarkan kebahagian punca nyalaan yang seterusnya mengurangkan halaju yang diperlukan untuk menstabilkan nyalaan. Keadaan ini hanya terbentuk pada nombor pusaran kritikal ($S_N > 0.6$).

2.6.2 Ciri-ciri Aliran Pusar

Jenis aliran di mana partikel bendalir bergerak dalam laluan bulatan, boleh dibezakan berdasarkan kepada sama ada ianya berputar atau pun nirputar ataupun biasanya disebut sebagai vorteks paksa ataupun vorteks bebas.

Aliran pusar mempunyai komponen halaju tangen. Komponen halaju tangen ini terdiri daripada vorteks bebas dan vorteks paksa ataupun disebut sebagai vorteks Rankine (Beer dan Chigier, 1972). Dalam kelikatan bendalir dinamik, aliran berputar biasanya mempunyai satu teras pusat bagi putaran badan padu (ataupun vorteks paksa). Di luar kawasan teras pusat pula, terdapat keadaan vorteks bebas. Komponen halaju tangen adalah sifar pada paksi simetri. Kedudukan bagi halaju tangen maksimum dan hubungannya dengan paksi susuk halaju, membentuk elemen yang kritikal dalam medan aliran semasa merentasi penulu. Teras pusat bagi kawasan putaran badan padu menunjukkan medan aliran dan sifat-sifat gelora adalah berbeza daripada apa yang ditunjukkan oleh medan aliran vorteks bebas keliling.

2.6.3 Nombor Pusar, S_N

Pusaran mempunyai kesan yang besar ke atas aliran seperti penghasilan jet, saiz dan bentuk nyalaan serta kestabilan dan keamanan pembakaran. Untuk mentakrifkan darjah pusaran, nilai tanpa dimensi digunakan untuk mewakili nisbah fluks arah paksi bagi momentum pusaran kepada fluks arah paksi bagi momentum paksi di darap dengan jejari seragam nozel. Parameter pusaran ini diwakili dengan simbol S_N iaitu nombor pusar yang digunakan untuk menunjukkan kekuatan sesuatu pusaran. Perwakilan matematik bagi definasi nombor pusar di berikan oleh Syred dan Beer (1974) sebagai:

$$S_N = \frac{G_\theta}{G_x R} \quad (2.17)$$

dengan:

G_θ ialah fluks arah paksi bagi momentum pusar.

Dengan memasukkan rangkap tegasan ricih gelora dalam arah $x - \theta$, menjadikan;

$$= \int_0^R (Wr) \rho U 2\pi dr = \text{malar} \quad (2.18)$$

G_x ialah fluks arah paksi bagi momentum paksi.

Dengan memasukkan rangkap tegasan normal gelora dalam arah x dan rangkap tekanan (tujahan paksi) memberikan;

$$= \int_0^R 2U \rho U \pi dr + \int_0^R 2p \pi dr = \text{malar} \quad (2.19)$$

dengan:

R ialah jejari seragam nozel sementara u, v dan w adalah komponen halaju (x, r, θ) dalam arah koordinat kutub dalam bentuk silinder.

Oleh kerana rangkap tekanan dalam persamaan (2.19) sukar ditentukan disebabkan tekanan berubah mengikut kedudukan dalam pusaran jet, definisi untuk nombor pusar di atas boleh dipermudahkan dengan mengabaikan rangkap tekanan tersebut. Nombor pusar juga boleh ditakrifkan sebagai:

$$S'_N = \frac{G_\theta}{G'_x R} \quad (2.20)$$

dengan

$$G'_x = \int_0^R 2U^2 \rho \pi r dr \quad (2.21)$$

Nombor pusar seharusnya boleh ditentukan daripada nilai halaju yang diukur dan daripada susuk tekanan statik. Walau bagaimanapun, keadaan ini biasanya tidak

mungkin berlaku disebabkan keputusan ujikaji yang tidak tepat. Maka, boleh dikatakan nombor pusar yang dikira daripada bentuk geometri kebanyakan penjana pusaran boleh diterima. Menurut Claypole dan Syred (1981), jika diandaikan bahawa percampuran sempurna berlaku dan perubahan momentum gerakan dapat dikekalkan, maka nombor pusar boleh ditakrifkan dalam rangkap geometri sebagai;

$$S_g = \frac{r_o \pi r_e}{A_t} \left[\frac{\text{aliran tangen}}{\text{jumlah aliran}} \right]^2 \quad (2.22)$$

dengan;

r_e ialah jejari pusaran keluar

r_o ialah jejari tangen masukan dari pusat pemusar

A_t ialah jumlah luas masukan tangen

Aliran tangen dan jumlah aliran boleh dikira seperti berikut;

$$\text{Aliran jisim tangen} = \rho A_{th} V_2 \sin \theta$$

$$\text{Aliran jisim jejari} = \rho A_{th} V_2 \cos \theta$$

$$\text{Jumlah aliran jisim} = \rho A_{th} V_2 (\sin \theta + \cos \theta)$$

dengan;

V_2 ialah halaju min pada keluaran pemusar

A_{th} ialah luas kawasan kerongkong minimum pemusar

Ini memberikan formula berikut untuk geometri nombor pusar;

$$S_g = \frac{r_o \pi r_e}{A_t} \left[\frac{\tan \theta}{1 + \tan \theta} \right]^2 \quad (2.23)$$

Bentuk nombor pusar geometri yang lain telah di berikan oleh Al-Kabie (1989) dan boleh di tulis sebagai;

$$S_a = \frac{\sin \theta}{1 + \frac{1}{\tan \theta}} \left[\frac{A_3}{C_c A_2} \right] \quad (2.24)$$

dengan

A_3 ialah luas keluaran pemusar

A_2 ialah luas kawasan kerongkong minimum pemusar

C_c ialah pekali pengecutan pemusar

Nilai untuk C_c iaitu pekali pengecutan pemusar, C_D iaitu pekali discas pemusar dan seterusnya nombor pular boleh diperolehi dengan menggunakan persamaan (2.21).

Pekali kejatuhan tekanan, K_{th} boleh ditulis dalam bentuk kadar alir jisim seperti dibawah;

$$K_{th} = 2\rho\Delta P \left(\frac{A_2}{m} \right)^2 \quad (2.25)$$

dengan

ΔP ialah kejatuhan tekanan

m ialah kadar alir jisim

Pekali discas, C_D boleh ditulis sebagai;

$$C_D = \frac{1}{\sqrt{K_{th}}} \quad (2.26)$$

dengan menggabungkan persamaan (2.25) dan (2.26) satu persamaan untuk pekali dalam bentuk kejatuhan tekanan pemusar dan kadar alir jisim udara dapat ditulis sebagai;

$$C_D = \frac{m}{A_{th} \sqrt{2\rho\Delta P}} \quad (2.27)$$

Pekali kejatuhan tekanan boleh juga ditunjukkan dalam bentuk pekali pengecutan iaitu;

$$K_{th} = \left(\frac{1}{C_C} - \frac{A_{th}}{A_3} \right)^2 \quad (2.28)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2.27) dan (2.28), pekali pengecutan dalam bentuk pekali discas, luas kerongkong dan luas keluasan pemusar dapat ditunjukkan seperti bentuk di bawah;

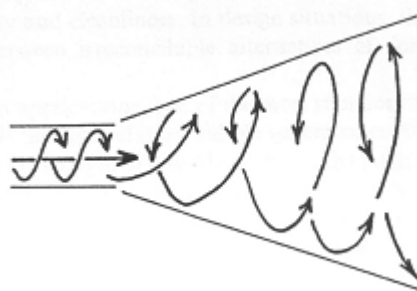
$$C_C = \frac{C_D}{1 + \left(\frac{C_D A_{th}}{A_3} \right)} \quad (2.29)$$

Nilai pekali pengecutan, C_C adalah bergantung kepada nilai pekali discas, C_D yang mana boleh diperoleh menerusi ujikaji. Nilai pekali pengecutan yang digunakan dalam persamaan (2.24) digunakan untuk menentukan nombor pusar geometri oleh Al-Kabie, S_a .

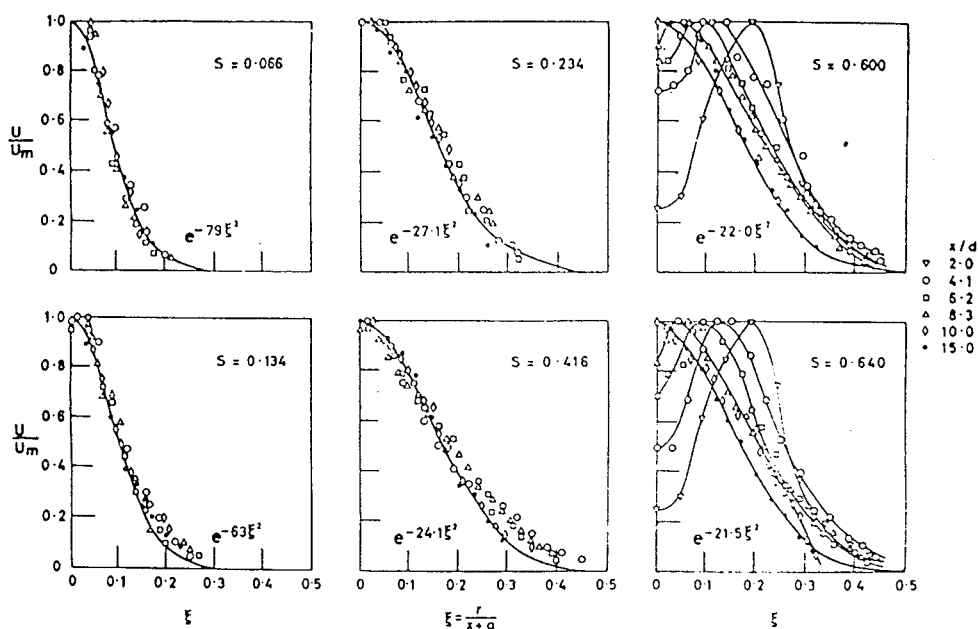
Nombor pusar untuk kebanyakan penulu biasanya dalam julat 0.6 hingga 2.5. nilai nombor pusar yang kurang daripada 0.6 dianggap pusaran lemah dan sistem pusaran jenis ini sukar untuk menyebabkan edaran semula apabila dikenakan tekanan paksi. Hanya pada nombor pusar yang lebih daripada 0.6 akan memulakan aliran balikan.

2.6.3.1 Aliran pusaran lemah ($S_N < 0.6$)

Dalam sistem pusaran dengan arus pusaran lemah, kecerunan tekanan paksi adalah tidak cukup kuat untuk menyebabkan zon edaran semula wujud. Pusaran lemah mempunyai penggunaan yang terhad kerana boleh menyumbang kepada pemanjangan nyalaan di mana hanya digunakan di dalam beberapa aplikasi tertentu sahaja. Bentuk pusaran lemah dapat dilihat pada Rajah 2.9.



Rajah 2.9 Bentuk aliran pusaran lemah (Gupta, Lilley dan Syred, 1984).

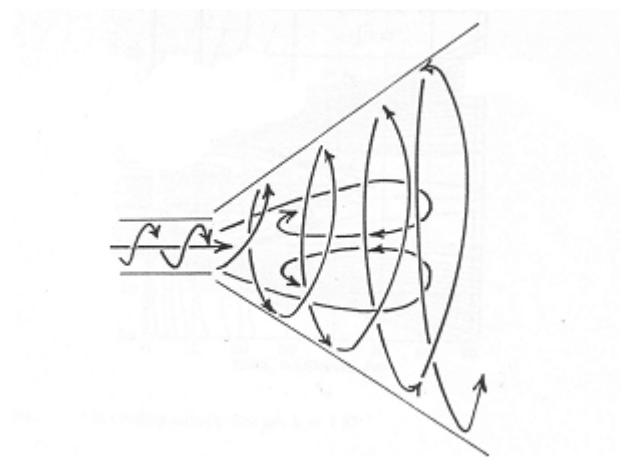


Rajah 2.10 Taburan jejarian halaju paksi (Beer dan Chigier, 1972).

Untuk penjana pusing masukan tangen, dapat dilihat kesamaan dengan profil halaju yang wujud sehingga ke nombor pusing $S_N=0.6$. Halaju paksi dapat dilihat jatuh kepada dua bentuk seperti dalam Rajah 2.10. Bagi nilai nombor pusing S_N sehingga 0.416, bentuk profil adalah seperti yang digambarkan sementara itu untuk nombor pusing lebih besar dari 0.5, halaju maksimum berubah tempat daripada paksi aliran jet dan bagi nombor pusing di atas 0.6, aliran balikan bermula (Beer dan Chigier, 1972).

2.6.3.2 Aliran pusaran kuat ($S_N > 0.6$)

Apabila keamatan pusaran bertambah dalam satu jet, pengurangan kecerunan tekanan di sepanjang paksi jet tidak boleh ditampung lagi oleh tenaga kinetik bagi partikel bendalir dalam arah paksi, dan satu aliran edaran semula wujud dalam bahagian pusat jet di antara dua titik genangan (Gupta, Lilley dan Syred, 1984). Rajah 2.11 menunjukkan aliran pusaran kuat.



Rajah 2.11 Bentuk aliran pusaran kuat (Gupta, Lilley dan Syred, 1984).

Zon edaran semula ini yang mempunyai bentuk sebuah vorteks '*torroidal*' memainkan peranan yang penting dalam kestabilan nyalaan, kerana ia mempunyai zon percampuran untuk hasil pembakaran dan bertindak sebagai satu tempat

penyimpanan haba dan spesis aktif kimia yang terletak di bahagian tengah jet berhampiran dengan tekak pemusar.

2.6.4 Kesan tahap pusaran

Aliran pusar memberikan kesan peningkatan yang drastik ke atas medan aliran yang dihasilkan selaras dengan penambahan kekuatan (keamatan) pusaran. Apabila pusaran bertambah, sudut serakan bagi jet akan bertambah membuatkan pertemuan udara pada satu sudut dan dengan satu komponen halaju tangen. Bersesuaian dengan penambahan ini, iringan aliran akan bertambah, menyebabkan pereputan bagi halaju dan percampuran dengan bendalir nozel berlaku dengan pantas.

Pusaran memberikan beberapa kesan penting dalam sistem pembakaran. Kesan utama dalam sistem pembakaran ialah memperbaiki kestabilan dan melanjutkan had kebolehnya. Had ini dilanjutkan dengan cara menambahkan halaju pembakaran gelora pada nyalaan utama dan seterusnya memastikan tidak berlaku pepadaman pada nyalaan. Fricker dan Leukel (1976) telah memerhatikan bahawa penggunaan aliran pusar telah dapat membantu dalam mengurangkan pepadaman yang berlaku disebabkan variasi yang kecil dalam nisbah bahan api udara.

Penambahan keamatan aliran pusaran akan menambahkan panjang kawasan edaran semula dan diameternya. Ini berlaku hanya selepas aliran nombor pusar kritikal iaitu lebih daripada 0.6. Selepas kawasan edaran semula telah berada pada keadaan stabil, penambahan nombor pusar yang seterusnya tidak akan memberikan kesan yang ketara terhadap saiz kawasan itu. Beltagui dan MacCallum (1976) telah menunjukkan diameter maksimum bagi pusat kawasan edaran semula adalah tidak dipengaruhi oleh penambahan nombor pusar setelah kawasan edaran semula telah berada dalam keadaan yang stabil. Diameter maksimum bagi kawasan edaran semula dikawal oleh diameter tekak pemusar. Khalil (1977) juga menunjukkan kesan yang

sama dan didapati terdapat hubungan yang linear di antara keamatan pusaran dan kadar alir jisim purata dan maksimum yang diedarkan semula.

Satu cara untuk meningkatkan nombor pusar ialah dengan menambahkan sudut bilah pandu pemusar. Beberapa kajian menunjukkan kesan penambahan sudut bilah pandu dan didapati sudut bilah pandu yang optimum akan berlaku kawasan edaran semula yang maksimum. Rao (1983) menjalankan pengkajian satu julat sudut bilah pandu dari 0° ke 60° . Beliau mendapati bahawa sudut bilah pandu 45° , pemusar akan menghasilkan saiz kawasan edaran semula yang besar. Penambahan seterusnya kepada 60° pula akan menyebabkan saiz kawasan edaran semula berkurangan. Rhode (1983) juga membuat kesimpulan yang sama iaitu sudut bilah pandu 45° , akan menghasilkan saiz kawasan edaran semula yang maksimum.

Walau bagaimanapun, Frisker dan Leuckel (1976) mempunyai pendapat yang berbeza. Mereka percaya penambahan dalam keamatan pusaran akan membantu dalam percampuran bagi bahan api dan udara berbanding dengan cara menghantar kembali aliran balikan bagi gas panas ke tekak pembakar. Claypole dan Syred (1981) pula berpendapat dan percaya bahawa nyalaan tidak akan stabil dengan mengedar semula spesis aktif panas dalam kawasan edaran semula pada purata masa yang besar. Sebaliknya, nyalaan distabilkan dengan cara pembentukan kawasan campuran sempurna di mana spesis aktif panas dan reaktan baru isoterma bercampur dengan baik. Walau bagaimanapun, kawasan ini dipengaruhi oleh darjah keamatan pusaran.

Walaupun telah dipersetujui bahawa pusaran menstabilkan nyalaan, Gupta, Sriramulu dan Domkunwar (1979) menyatakan bahawa pusaran yang berlebihan akan menyebabkan nyalaan lemah dan tidak stabil. Ini menunjukkan untuk darjah pusaran yang tinggi, vorteks yang mewujudkan edaran semula akan bertambah dari segi saiz. Sebagai tambahan, untuk kestabilan nyalaan, pusaran juga membantu dalam mengurangkan panjang nyalaan. Milosavljevic (1990) menunjukkan kesan ini menggunakan nyalaan tanpa pracampur. Beltagui dan MacCallum (1988) juga menunjukkan kesan yang sama menggunakan suntikan bahan api sisi. Keputusan ini didapati dalam pembakar pendek yang boleh melakukan pembakaran lengkap.

Mestre (1974) pula mengkaji sebuah pembakar dengan dan tanpa pusaran. Beliau menunjukkan bahawa pusaran membantu meningkatkan kecekapan pembakaran dalam lingkungan 19% di samping mengurangkan tahap pencemaran pada jidar yang selamat. Beliau juga memerhatikan nyalaan dengan pusaran adalah berwarna biru yang menunjukkan percampuran adalah baik sementara itu sistem tanpa pusaran menunjukkan nyalaan berwarna kuning. Keadaan ini menunjukkan terdapat sebahagian bahan api (kerosin) yang tidak terbakar. Keadaan ini juga membuktikan bahawa pusaran membantu dalam pancitan cecair bahan api. Nyalaan panjang berwarna kuning yang dilihat memberitahu bahawa nyalaan tidak bercampur dengan sempurna dan boleh menyumbang kepada lebih banyak pembentukan pencemaran. Walau bagaimanapun Ahmad (1985) mengatakan bagi satu aliran tertutup, nombor pusar yang tinggi boleh membantutkan usaha untuk mendapatkan kecekapan pembakaran yang tinggi untuk nyalaan pracampuran pada nisbah kesetaraan yang cair ($\phi < 0.7$). Selain itu, beliau menunjukkan bahawa dengan mengambil nombor pusar pada satu nilai malar, dan meningkatkan kehilangan tekanan akan meningkatkan kecekapan pembakaran.

2.6.5 Fenomena kerosakan vorteks

Perilaku aliran pusar pada keamatan tinggi amat rumit dengan beberapa kelainan pada ketidakstabilan dan perubahan bentuk aliran dalam pelbagai variasi nombor Reynolds dan nombor pusar. Fenomena ini bukan hanya memberi kesan kepada kestabilan pemusar bilah pandu tetapi juga kepada penjana pusar yang lain seperti pengasing habuk siklon, penyuntik bahan api pusar dan vorteks hujung sayap bagi pesawat terbang. Dalam aliran pusar yang mengandungi kekuatan pusaran malar, apabila nombor Reynolds bertambah, ketidakstabilan terbentuk. Pada permulaannya, ia akan membentuk gelembung kecil di dalam pusaran bagi bendalir yang beredar di atas paksi simetri. Aliran ini akan kembali pada bentuk yang stabil pada jarak tertentu dan kembali membentuk gelembung-gelembung kecil. Kerosakan vorteks dipercayai menjadi fenomena utama yang bertanggungjawab kepada pembentukan edaran semula pada pusat pusaran (Gupta, Lilley dan Syred, 1984).

Fenomena ini juga boleh terjadi dengan penambahan nombor pusar pada nombor Reynolds malar.

2.6.6 Kejatuhan tekanan

Percampuran bahan api yang pantas berlaku dapat dicapai semasa udara pada aliran gelora dengan menggunakan pemusar udara. Percampuran yang baik penting untuk mengurangkan pembentukan pencemaran. Tenaga gelora diwujudkan daripada tenaga tekanan semasa melalui penstabil nyalaan. Dalam pemusar udara, gelora boleh dijana dengan menambahkan penyekat ataupun dengan mengurangkan isi padu semasa melintasi pemusar udara. Terdapat beberapa cara untuk mendapatkan keadaan begini, dengan menambahkan darjah sudut pusaran, mengurangkan diameter luaran pemusar dengan menggunakan penutup atau plat orifis atau dengan menambahkan bilangan bilah pandu. Kesemua cara ini juga menambahkan saiz kawasan edaran semula, dan bersama-sama dengan gelora yang terjana daripada kawasan lapisan ricihan akan menambahkan kadar keberkesanan percampuran bahan api udara.

Berasaskan kepada prinsip keabadian momentum dan tenaga, Knight dan Walker (1957) menerbitkan ungkapan berikut untuk kehilangan tekanan pemusar paksi bilah nipis.

$$\Delta P_{sw} = K_{sw} q_{ref} \left[\left(\frac{A_{ref}}{A_{sw}} \right)^2 \sec \theta - \left(\frac{A_{ref}}{A_3} \right)^2 \right] \left(\frac{\dot{m}_{sw}}{\dot{m}_3} \right)^2 \quad (2.30)$$

dengan:

ΔP_{sw} = jumlah kejatuhan tekanan disebabkan pemusar

A_{sw} = luas hadapan pemusar

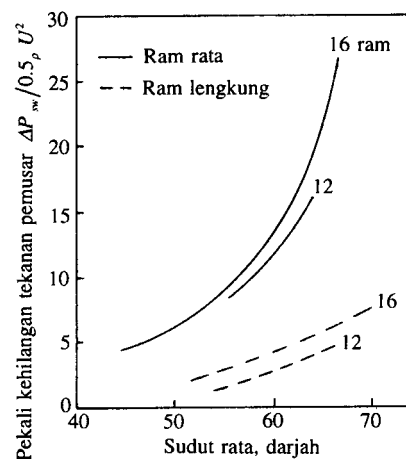
θ = sudut bilah

K_{sw} = pekali bilah (1.13 untuk bilah rata, 1.15 untuk bilah lengkung)

Dari pandangan reka bentuk, persamaan (2.30) boleh ditulis semula dalam bentuk yang lebih mudah sebagai:

$$\dot{m}_{sw} = \left\{ \frac{2q_{ref} \Delta P_{sw}}{K_{sw} \left[(\sec \theta / A_{sw})^2 - 1 / A_3 \right]^2} \right\}^{0.5} \quad (2.31)$$

Kilik (1976) telah menyiasat ciri kehilangan tekanan pemusar paksi dalam siri ujikaji yang telah direka bentuk untuk memisahkan kesan jenis bilah (rata dan lengkung) dari sudut bilah. Keputusan ini dapat dirumuskan dalam Rajah 2.12 berikut.

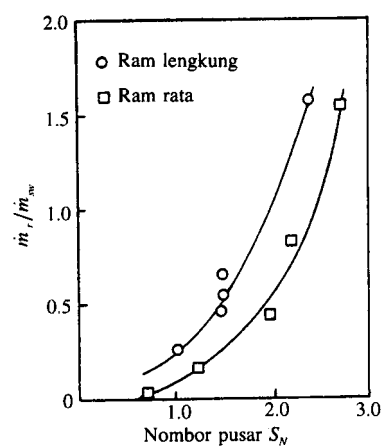


Rajah 2.12 Pengaruh sudut dan jenis bilah terhadap pekali kehilangan tekanan (Kilik, 1976).

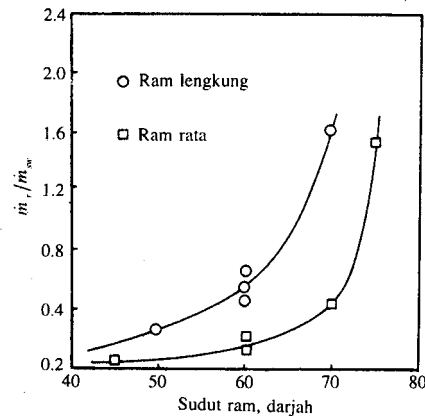
Daripada rajah pengaruh sudut dan jenis bilah/ram terhadap pekali tekanan menunjukkan bahawa pemusar bilah lengkung memberikan kurang kehilangan tekanan berbanding dengan pemusar bilah rata; perbezaan menjadi ketara apabila sudut bilah meningkat. Bilah rata selalunya dihasilkan kerana mudah dalam pembuatan, tetapi bilah lengkung sering digunakan bagi mendapatkan sifat aerodinamik yang lebih baik. Kilik (1976) mendapati kehilangan tekanan tidak

merupakan kebaikan yang ketara pada sesebuah pembakar. Terdapat faktor lain yang lebih penting iaitu kadar aliran jisim balikan. Bagi bilah lengkung untuk sebarang kadar alir, bilah lengkung menghasilkan kawasan edaran semula yang lebih besar. Selain itu juga, pemusar bilah lengkung membenarkan aliran paksi bergerak untuk membelok secara beransur-ansur sebelum pemisahan aliran di bahagian sedutan bilah, maka belokan menghasilkan pusaran lebih licin dan lengkap serta komponen halaju jejarian yang lebih tinggi boleh dijana pada keluaran pemusar.

Pengukuran halaju yang dijalankan di sepanjang paksi pemusar untuk membandingkan antara bilah rata dan lengkung dalam menentukan pengaruh geometri terhadap aliran balikan. Kilik (1976) telah menjalankan ujikaji menggunakan bilah lengkung dan membandingkan keputusannya dengan Mathur dan Maccallum (1967) yang menggunakan bilah rata. Keputusan bagi melihat kesan bentuk bilah terhadap saiz zon edaran semula dan pengaruh sudut bilah terhadap jisim balikan maksimum dapat dilihat pada Rajah 2.13 dan Rajah 2.14.



Rajah 2.13 Pengaruh nombor pusar terhadap aliran jisim balikan maksimum (Mathur dan Maccallum, 1967).



Rajah 2.14 Pengaruh sudut bilah terhadap aliran jisim balikan maksimum (Mathur dan Maccallum, 1967).

Sementara itu, Syred dan Beer (1974) merumuskan bahawa penggunaan pemusar aliran jejarian adalah lebih baik berbanding pemusar aliran paksi di mana kecekapan pusingan sehingga 80%. Selain itu penggunaan pemusar aliran jejarian dapat mewujudkan nyalaan yang stabil dan pendek. Rumusan ini juga dipersetujui oleh Beltagui dan Maccallum (1976), mereka menggunakan pemusar aliran jejarian dan mendapati kestabilan pembakaran dipengaruhi oleh saiz edaran semula. Selain itu, nombor pusing juga mempengaruhi dalam pembentukan saiz edaran semula. Beltagui dan Maccallum (1988) mendapati penggunaan pemusar aliran jejarian memberikan percampuran yang baik antara bahan api udara dan dapat mengurangkan saiz zon bersuhu tinggi.

2.6.7 Kesan penyelitan plat orifis

Satu kaedah yang digunakan untuk memperbaiki kaedah pembakaran dan seterusnya mengurangkan pembentukan emisi dengan meningkatkan kecekapan percampuran bahan api udara dan menghasilkan daya edaran semula yang tinggi adalah dengan meletakkan plat orifis pada bahagian satah keluaran pemusar, iaitu pada laluan masuk campuran bahan api udara ke kebuk pembakaran.

Orifis adalah merupakan satu lubang yang ditebuk pada satu plat nipis (~3mm). Aliran yang melalui orifis akan mengalami pengurangan tekanan dan peningkatan halaju tetapi nilai entalpi bagi bendalir tersebut tidak berubah. Penyelitan plat orifis ke atas pembakar menghasilkan beberapa kesan, antaranya adalah seperti berikut:

- i. Tekanan pada fasa jalan keluar pusan akan berkurangan maka lapisan ricihan gelora laluan keluar pusan akan meningkat dan membantu percampuran.
- ii. Tekanan '*vane passage*' akan meningkat berbanding tekanan '*outlet plane*' ini akan membentuk gelora maksimum pada lapisan ricihan pusan (Mohd. Nazri, Andrews dan MkPadi, 1999) .
- iii. Dari sudut reka bentuk aerodinamik darjah percampuran akan meningkat dengan penambahan nilai faktor kehilangan tekanan. Faktor ini dinyatakan dalam nisbah kehilangan tekanan pembakar terhadap turus dinamik yang berpandukan rujukan kawasan aliran pembakar (Demetri, 1974).

$$\frac{\Delta P}{q_{ref}} \sim (\Delta P) A_{ref}^2 \quad (2.32)$$

dengan:

ΔP = tekanan pembakar

q_{ref} = turus dinamik

A_{ref} = luas permukaan kawasan aliran pembakar

- iv. Peningkatan kehilangan tekanan ini akan menyebabkan peningkatan percampuran dengan meningkatkan tenaga udara jet yang memasuki paksi pembakar yang berfungsi aliran utama (Demetri, 1974).

Peningkatan halaju bendalir semasa keluar daripada plat orifis juga memberi kesan kepada pembakaran. Kesan peningkatan halaju adalah seperti berikut:

- i. Peningkatan halaju ini akan mengelakkan nyalaan dari berpatah balik ke kawasan campuran kerana halaju lebih tinggi daripada halaju nyalaan.
- ii. Namun jika halaju terlalu tinggi maka '*lift-off*' akan berlaku dari pembakar ke lingkungan di mana nyalaan akan terpadam dengan iringan udara tambahan di sekeliling pembakar.
- iii. Apabila halaju meningkat maka nombor Reynolds akan turut meningkat, kesan peningkatan nombor Reynolds ini akan menambahkan kekuatan gelora, dan seterusnya akan mengurangkan masa mastautin.

Perubahan mendadak aliran apabila melintasi orifis dari masukan ke kebuk pembakaran akan menstabilkan zon edaran semula (Graves dan Scull, 1960; Miller, 1998). Ini akan melengkapkan peningkatan keseluruhan kecekapan pembakar untuk pembakar pendek. Edaran semula ini akan menstabilkan nyalaan dan menyediakan had peningkatan keseluruhan pepadaman.

Untuk nisbah kesetaraan yang sama atau udara yang berlebihan, orifis ini akan mengurangkan haba masukan pembakar. Campuran gelora di dalam zon tindak balas dan kawasan pencairan bergantung kepada bentuk aliran kompleks yang terhasil dan ini akan berlaku apabila aliran melintasi plat orifis. Beberapa pengkaji (Mohd Nazri, Andrews dan MkPadi, 1999; Mohd Nazri *et al.*, 2002) membuktikan bahawa bentuk orifis yang digunakan untuk udara masuk akan mempengaruhi campuran dan keseluruhan kecekapan pembakar. Diameter orifis adalah penting kerana, jika diameter terlalu kecil maka aliran campuran mungkin akan bergerak dengan begitu laju dan ini akan mendatangkan kesan buruk kepada nyalaan yang terhasil. Orifis ini juga akan mengurangkan kawasan aliran pusar keluar kerana jika tidak dikurangkan, menyebabkan berlaku nyalaan kaya.

2.7 Kesimpulan penyelidikan terdahulu

Beberapa penyelidik telah mengkaji kesan pengubahan kekuatan pusaran di mana tujuan utama adalah untuk melihat corak aliran dan profil suhu pembakaran. Mereka menegaskan bahawa pengubahan pada kekuatan pusaran memberi kesan terhadap pembentukan zon edaran semula dan geometri nyalaan dan seterusnya memberi kesan terhadap pembentukan emisi daripada pembakaran.

Mikus dan Heywood (1971) menjalankan penyelidikan terhadap turbin gas automotif. Beliau memberi kesimpulan, dengan mencairkan zon pembakaran utama atau mengurangkan sela masa pembakaran terhadap pembakar dan suntikan bahan api konvensional dapat mengurangkan pembentukan emisi NO_x kepada piawaian sedia ada. Keadaan ini sesuai dengan perihai pembakaran stoikiometri di mana terdapat udara yang cukup untuk melengkapkan pembakaran. Pengurangan emisi dapat dicapai dengan merekabentuk pembakar dengan keadaan cair dan pembakaran homogen untuk nisbah udara bahan api di zon pembakaran utama pada pembakar rekabentuk konvensional.

Beberapa siri pembakar telah diuji oleh Mularz dan rakan-rakan (1975) untuk menilai reka bentuk model pemusar. Objektif utama adalah untuk mendapatkan aras emisi ekzos yang paling rendah serta mengekalkan kecekapan pembakaran yang tinggi pada sebarang keadaan pembakaran. Mereka memberi pendapat bahawa modul pemusar udara boleh digunakan pada tiga komponen utama sebelum pembakaran iaitu karburetor, pemusar dalaman dan pemusar untuk kestabilan nyalaan. Fungsi modul pemusar ini adalah untuk mencampur bahan api udara sebelum pembakaran seterusnya dapat menstabilkan nyalaan dan menjadi komponen antara muka campuran bahan api dan nyalaan pembakar. Mereka juga mendapati pembakar dengan pusaran dapat meningkatkan kecekapan pembakaran

Sementara itu, Ballal dan Lefebvre (1979), dalam pengkajian mereka terhadap nyalaan pracampur, had pemadaman lemah dan dipengaruhi oleh suhu masukan udara pada pembakar, pengurangan halaju udara dan aras gelora yang wujud di mana kesemua ini tidak bergantung kepada tekanan.

Beberapa penyelidik terdahulu juga mengkaji kesan mempelbagaikan sudut bilah yang akan mengubah nombor pusar untuk melihat prestasi pembakaran. Claypole dan Syred (1981) mengkaji kesan kekuatan pusaran terhadap pembentukan NO_x . Mereka menyimpulkan ketika nombor pusar pada 3.04, gas NO_x hasil daripada pembakaran telah diedarkan semula ke bahagian hadapan nyalaan. Dengan ini jumlah emisi NO_x dapat dikurangkan tetapi juga kecekapan pembakaran menurun.

Al-Kabie (1989), telah menjalankan penyelidikan berkenaan kesan penggunaan pemusar udara aliran jejarian terhadap pengurangan emisi di dalam pembakar. Dalam kajian tersebut, beliau berpendapat pemusar dengan nisbah keluasan 1.8 memadai untuk mencapai kecekapan pembakaran yang diperlukan. Kajian itu juga menunjukkan kecekapan yang tinggi tidak dapat diperolehi di dalam kawasan pusaran lemah sehingga terdapat perubahan pada nisbah pemusar dan ini dikaitkan dengan kawasan edaran semula. Walau bagaimanapun, terdapat kesan yang kecil jika perubahan pada nisbah pemusar seperti had pemadaman yang lemah. Al-Kabie juga menunjukkan jika bahan api disuntik di luar kawasan edaran semula iaitu dari dinding ke tepi kawasan edaran, emisi NO_x akan meningkat kerana pembakaran memerlukan masa yang panjang dan kurang berlaku percampuran antara bahan api dan udara baru dari pembakar. Untuk mengurangkan kesan ini pada aplikasi pembakar, penyelitan plat orifis pada bahagian keluaran tekak pemusar boleh digunakan. Tujuan penyelitan ini untuk membias bahan api di kawasan dinding secara jejarian melengkung ke dalam masuk ke kawasan lapisan ricih. Pelbagai kaedah baru suntikan bahan api digunakan dalam penyelidikan beliau seperti suntikan pada bilah pemusar, suntikan tunggal pada tekak pemusar dan suntikan pada dinding pembakar menggunakan bahan api gas (gas asli dan propana). Kesemua pengujian dijalankan pada pembakar menggunakan konsep pembakaran dua peringkat stoikiometri cair bahan api. Beliau membuktikan tidak ada kesan yang drastik terhadap emisi NO_x berlaku jika mempelbagaikan sudut bilah pemusar jejarian dari 20° ke 60° atau dengan kata lain nombor pusar dari 0.41 hingga 3.25. Walaupun begitu pada nombor pusar yang tinggi melebihi 3.25, emisi NO_x adalah tinggi untuk kesemua nisbah setara untuk dua suhu kemasukan udara iaitu 400K dan 600K. Kesan yang sama juga dibuktikan semasa beliau menukar bahan api dari gas asli ke propana. Kecekapan pembakaran dan had kebolehnya pada keadaan cair meningkat dengan pertambahan kekuatan pusaran. Kaedah lain yang digunakan

untuk meningkatkan kekuatan pusaran tanpa mengubah sudut bilah dengan menambah kedalaman bilah.

Escott (1993) mengkaji aliran pembakaran pada tiga kaedah penjanaan pusaran iaitu pusaran tunggal, pusaran arah pusingan jam dan lawan pusingan jam. Beliau menggunakan tiga kaedah asas suntikan bahan api iaitu suntikan tunggal di pusat pemusar, suntikan pada laluan bilah dan suntikan pada dinding pembakar menggunakan bahan api gas. Escott mendapati emisi NO_x adalah rendah apabila menggunakan suntikan bahan api tunggal di pusat pemusar tetapi lebih rendah jika menggunakan kaedah suntikan pada dinding pembakar. Namun begitu, beliau menegaskan keputusan ini sangat bergantung kepada suhu masukan pembakar dan tekanan yang dikenakan pada aliran. Beliau juga menjalankan ujikaji pada pembakar yang menggunakan kaedah suntikan bahan api berperingkat mudah dan mendapati tiada pembaikan yang ketara sama ada dari aspek emisi mahupun kestabilan pembakaran jika dibandingkan tanpa suntikan bahan api berperingkat. Gabungan pusaran aliran arah jam dan lawan jam dengan suntikan pada bilah awal pemusar udara memperbaiki kestabilan nyalaan tetapi berlaku kenaikan emisi NO_x yang mendadak. Daripada pemerhatian yang dibuat, beliau menyimpulkan emisi NO_x yang rendah dapat dijana daripada penggunaan sistem penjana pusaran tetapi kestabilan nyalaan menjadi bertambah buruk bersesuaian dengan pergerakan aliran pusar semasa proses percampuran bahan api udara di dalam lapisan ricih jet.

Kim (1995), dalam penyelidikannya, beliau menekankan penggunaan pemusar jejarian bilah lengkung dengan suntikan bahan api pada dinding pembakar dan suntikan pada bilah pemusar. Bahan api yang digunakan adalah gas asli dan propana. Beliau menyimpulkan kaedah suntikan pada bilah memberi kesan terhadap pengurangan emisi dibandingkan dengan penggunaan suntikan pada dinding pembakar menggunakan pembakar berdiameter 76mm kerana kaedah suntikan ini memberikan sela masa pembakaran yang panjang pada penjuru zon edaran semula. Dengan ini mewujudkan kawasan zon bahan api kaya dan meningkatkan NO_x haba. Selain itu juga, beliau mengkaji kesan pengurangan tebal bilah pemusar udara aliran jejarian dengan 40mm diameter tekak pemusar dan 45° sudut bilah. Kesannya, dengan peningkatan kekuatan pusaran dapat mengurangkan penghasilan emisi NO_x .

Kecekapan pembakaran dan had kebolehnya pada keadaan cair meningkat dengan pertambahan kekuatan pusaran.

Mohd Nazri dan rakan-rakan (1999) menjalankan penyelidikan terhadap kesan penggunaan aliran pusar terhadap pengurangan NO_x . Mereka mempelbagaikan sudut bilah pemusar jejarian dari 28.9° hingga 84.5° dan kesemua ujikaji menggunakan bahan api gas asli. Pengurangan NO_x sebanyak 25 peratus dan 33 peratus diperolehi untuk kehilangan tekanan pembakar 40mm dan 10mm H_2O . Mereka juga mendapati pada kehilangan tekanan pembakar sebanyak 10mm H_2O , nilai optimum sudut bilah ialah 51.1° dan pada kehilangan tekanan pembakar sebanyak 40mm H_2O , nilai optimum sudut bilah ialah 74.3° .

Mohd Radzi (2002) juga mengkaji kesan pengubahan sudut bilah pemusar aliran jejarian pada pembakar berbahan api cecair (kerosin). Beliau menyimpulkan sudut optimum bilah yang memberikan nilai emisi NO_x terendah adalah 60° . Terdapat kenaikan semula nilai emisi NO_x pada bilah pemusar 70° dan 80° tetapi nilai CO masih menurun dengan peningkatan sudut bilah. Beliau menyimpulkan saiz zon edaran semula dan kesan aliran gelora membantu dalam pengurangan emisi.

BAB 3

REKA BENTUK PEMUSAR UDARA, KEBUK PEMBAKAR DAN PENYEDIAAN RIG UJIKAJI

Bahagian ini mengandungi penerangan lengkap berkenaan reka bentuk pemusar udara aliran jejarian dan diikuti dengan reka bentuk kebuk pembakar untuk pengujian. Seterusnya, penerangan sistem ujikaji dan prosedur pengujian pembakar berbahan api cecair berskala makmal untuk kegunaan industri.

3.1 Pengenalan

Sejak bertahun lalu, beberapa kaedah dan strategi telah digunakan untuk membangunkan sebuah pembakar berbahan api cecair yang dapat mengurangkan penghasilan gas oksida nitrogen daripada sistem pembakaran. Kesemua kaedah dan strategi ini berkonsepkan fakta bahawa penghasilan NO_x terma dapat dikurangkan apabila pembakar tidak beroperasi pada keadaan stoikiometri, iaitu sama ada pada keadaan cair bahan api atau kaya bahan api. Selain itu ciri lain yang penting adalah faktor aerodinamik semasa percampuran bahan api udara, memainkan peranan penting pada prestasi pembakar (Lefebvre, 1983). Percampuran yang baik perlu semasa kadar nyalaan tinggi dan untuk mengurangkan pembentukan emisi NO_x ,

sedangkan taburan suhu pembakar iaitu faktor utama pembentukan NO_x haba adalah bersandar kepada darjah percampuran antara bahan api dan udara di zon pembakaran utama. Walaupun begitu, percampuran yang baik boleh dicapai dengan pertambahan panjang kebuk dan tekanan yang rendah. Dengan demikian, objektif utama proses mereka bentuk sebuah pembakar perlu mengambil kira faktor percampuran bahan api, corak aliran sepanjang pembakar dengan panjang pembakar dan tekanan yang rendah minima.

Reka bentuk yang mengambilkira faktor aerodinamik memerlukan pengetahuan berkenaan aliran edaran semula, penembusan jet dan percampuran. Salah satu kaedah yang berkesan mewujudkan aliran edaran semula pada zon pembakaran utama adalah dengan memasang nozel bahan api di tengah kubah aliran pusar. Ini kerana, kawasan ini mempunyai pusaran yang kuat yang boleh menarik bahan api dan bercampur dengan udara dengan tinggi.

3.2 Reka bentuk pemusar udara

Aliran pusar digunakan untuk menstabilkan, mengawal nyalaan dan mencapai keamatan pembakaran yang tinggi. Kaedah yang umum menjana aliran pusar adalah menggunakan bilah pandu bersudut yang menjadi laluan kepada udara. Krateria aliran pusar ini bergantung kepada sudut bilah (Al-Kabie, 1989).

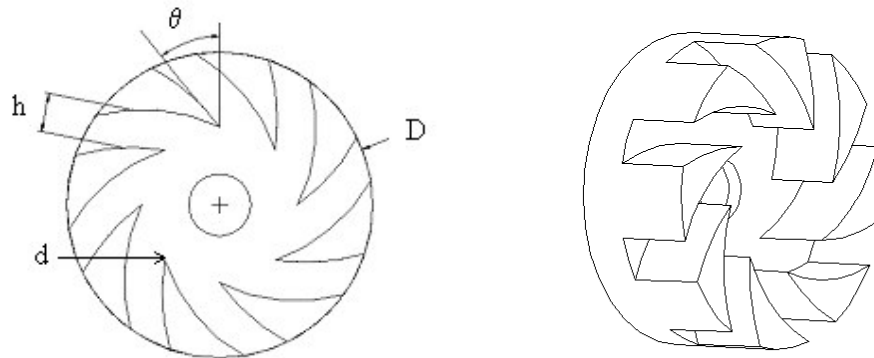
Kebanyakan pembakar konvensional menggunakan pemusar udara aliran paksi. Pemusar ini mudah diperbuat tetapi bilah lengkung memberikan prestasi yang lebih baik dari segi ciri aerodinamik (Beltagui dan Maccallum, 1976). Ahmad dan rakan-rakan (1985) menerangkan tentang masalah kecekapan dan kestabilan penggunaan pemusar aliran paksi pada aliran udara yang besar dengan suntikan bahan api tunggal. Al-Kabie (1989) menunjukkan masalah ini boleh diselesaikan dengan penggunaan pemusar aliran jejarian dan dengan beberapa pengubahan pada bahagian tekak pemusar akan mengubah ciri aerodinamik pemusar tersebut. Pemusar bilah rata memberikan kecekapan yang rendah kerana berlaku kepunahan pada aliran

semasa keluar dari tekak pemusar (Beltagui dan Maccallum, 1988). Pada aliran udara yang tinggi, pemusar aliran paksi mempunyai beberapa kelemahan dari segi keperluan udara yang digunakan untuk bercampur dengan bahan api dan memerlukan kebuk pembakar yang berdiameter lebih besar dan panjang. Sedangkan penggunaan pemusar aliran jejarian dapat memberikan lebih udara untuk bercampur pada kehilangan tekanan yang dikehendaki. Al-Kabie (1989) menerangkan terdapat pembaikan dari segi prestasi dan emisi NO_x dengan penggunaan pemusar jejarian sesuai dengan kemampuan pemusar ini dalam meningkatkan proses percampuran udara bahan api berdasarkan pusaran yang dihasilkan. Pemusar udara bilah lengkung aliran jejarian juga boleh mengelakkannya berlaku pemisahan aliran semasa di permukaan bilah. Al-Kabie (1989) mengkaji kesan penggunaan pemusar udara aliran jejarian pada sudut 30° , 45° dan 60° untuk melihat prestasi pembakaran. Meskipun pemusar 30° memberikan kecekapan pembakaran yang tinggi dan emisi CO dan UHC yang rendah tetapi nilai NO_x nya tinggi. Sementara itu, pemusar 45° dan 60° memberikan nilai sebaliknya.

Faktor aerodinamik pada pemusar jejarian bilah lengkung membolehkan aliran paksi membelok dengan landai dan licin. Dengan itu, kadar aliran belokan dan komponen halaju jejarian juga dijana lebih tinggi pada keluaran pemusar dan pusaran lebih stabil pada tekanan rendah. Al-Kabie (1989) menjalankan penyelidikan berkenaan pekali discas pada keadaan isoterma untuk pelbagai variasi sudut bilah pemusar jejarian. Beliau menunjukkan pemusar udara aliran jejarian memberikan pekali discas yang rendah, lebih kurang 0.6 dibandingkan dengan pemusar udara bersudut 0° , lebih kurang 0.9. Ini menunjukkan sudut bilah mempunyai pengaruh yang besar terhadap pekali discas pemusar. Charles dan Samuelson (1988) juga menunjukkan pembaikan yang besar terhadap nyalaan pembakar dengan menggunakan pemusar udara berperingkat apabila arah bahan api suntikan tunggal pada paksi bertukar lebih tinggi ke arah jejarian.

Reka bentuk pemusar udara aliran jejarian diberikan pada Rajah 3.1 dan maklumat lengkap terdapat pada Jadual 3.1. Nisbah pekali d/D adalah menghampiri 0.5 menurut Beer dan Chigier (1972). Jadual 3.2 menunjukkan perbezaan reka bentuk pemusar aliran jejarian penyelidik-penyelidik terdahulu. Pemusar ini dibuat

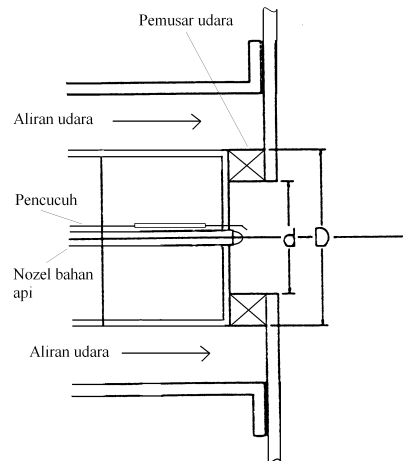
daripada keluli lembut dan melalui proses pemesinan. Pemasangan pemusar pada pembakar seperti ditunjukkan pada Rajah 3.2.



Rajah 3.1 Skema reka bentuk pemusar aliran jejarian

Jadual 3.1 Maklumat lengkap reka bentuk pemusar aliran jejarian

[illegible]



Rajah 3.2 Pemasangan pemusar aliran jejarian pada pembakar

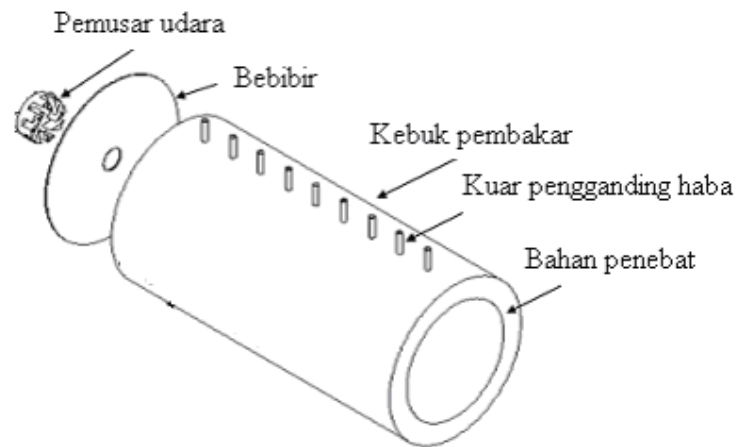
Jadual 3.2 Perbandingan reka bentuk pemusar antara penyelidik terdahulu

Pemusar Jejarian	Al-Kabie (1989)	Escott (1993)	Reka bentuk kini
D (mm)	127	76	98
d (mm)	76	40	50
L (mm)	30.5-11.5	32-8	25
d/D	0.598	0.526	0.510

3.3 Reka bentuk kebuk pembakar

Kebuk pembakar silinder berskala makmal telah digunakan sepanjang ujikaji penyelidikan ini. Panjang kebuk dan diameter luar kebuk ini adalah 1000mm dan 385mm menggunakan kepingan keluli lembut berketebalan 2.5mm. Untuk mengurangkan pemindahan haba keluar dan mendapatkan suhu yang tinggi dalam kebuk juga melindungi kebuk pembakar daripada panas lampau, lapisan bahan penekat jenis KIMCAST LW 11 setebal 50mm digunakan. Diameter dalam kebuk sebesar 280mm direka bentuk berdasarkan nozel bahan api plat orifis 1.0 gelen bahan api per jam (GPH) (Delavan, 2000). Kuar pengganding haba dipasang di sepanjang

kebuk pembakar berselang 100mm setiap satu di sudut 0° . Gambar skematik kebuk pembakar dapat dilihat pada Rajah 3.3. Pemusar dipasang pada bahagian bibir muka silinder yang ditebuk lubang berdiameter 50mm menyamai diameter tekak pemusar. Kuar agihan udara skunder dipasang pada jarak 100mm, 200mm dan 300mm dari dinding pemusar pada sudut 90° dan 270° . Kesemua pemasangan kuar ini bersudut tepat dengan kebuk pembakar.



Rajah 3.3 Skema reka bentuk kebuk pembakaran

3.3.1 Zon nyalaan

Zon nyalaan menempatkan api nyalaan. Tindak balas pembakaran berlaku di kawasan ini menghasilkan haba yang tinggi dan pembentukan gas emisi oksida nitrogen. Kawasan ini juga dikenali zon pembakaran. Ujikaji awal dijalankan tanpa kebuk pembakaran dan didapati panjang nyalaan dalam lingkungan 200 ke 300mm bergantung kepada nisbah kesetaraan, ϕ dari 0.7 hingga 1.2. Nyalaan pendek didapati pada keadaan cair bahan api dan bertambah dengan pertambahan nisbah kesetaraan. Suhu nyalaan setempat pula berkurang apabila panjang nyalaan bertambah. Oleh kerana ujikaji yang dijalankan memerlukan keadaan pembakaran yang berubah pada

nisbah bahan api udara, sudut bilah pusing, penyelitan plat orifis dan nisbah udara sekunder kepada jumlah udara maka panjang nyalaan akan berubah dengan berubahnya parameter-parameter tersebut. Suhu pembakaran tertinggi pada kebuk pembakar dijangkakan berlaku di dalam kawasan zon pembakaran. Kebuk pembakar direka bentuk supaya 50% ruang di dalamnya sebagai zon pencairan.

3.3.2 Penentuan panjang dan diameter nyalaan

Selain panduan yang diberikan oleh pengedar nozel bahan api (Delavan, 2000), saiz kebuk pembakar juga ditentukan dengan ujian pembakaran bagi membanding diameter dan panjang nyalaan. Semasa ujian ini pembakar dinyalakan pada keadaan udara terbuka dan suhu bilik. Gambar foto nyalaan diambil bersama tiub bagas pada pembakar. Saiz nyalaan iaitu diameter dan panjang nyalaan dibandingkan dengan saiz tiub bagas pembakar. Maka ukuran sebenar nyalaan diperolehi. Kaedah ini dijalankan pada beberapa ubahan nisbah bahan api udara bagi meningkatkan ketepatan ukuran. Saiz nyalaan maksimum diambil semasa reka bentuk kebuk pembakar. Apabila dibandingkan dengan saiz yang diberikan oleh pengedar nozel bahan api, didapati ukuran yang diberikan oleh pengedar sesuai untuk digunakan bagi mereka bentuk pembakar berbahan api cecair ini.

3.4 Nisbah bahan api udara (nisbah kesetaraan, ϕ)

Nisbah kesetaraan merupakan perbandingan antara nisbah bahan api per udara semasa ujikaji dengan nisbah bahan api per udara pada keadaan stoikiometri yang didapati melalui pengiraan. Ia dapat memberi gambaran tentang campuran yang terjadi di dalam kebuk pembakaran. Apabila nisbah kesetaraan bersamaan dengan 1.0 pada puncak aliran jisim udara, campuran bahan api dengan udara adalah sempurna dan nilai nisbah bahan api per udara ujikaji adalah bersamaan dengan nilai

nisbah bahanapi per udara stoikiometri. Nisbah setara yang melebihi nilai 1.0 pada sebelah luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran kaya bahan api. Manakala, nisbah setara yang kurang daripada 1.0 pada luar kawasan stabil pula menunjukkan campuran cair bahan api.

Secara jelas, nisbah udara bahan api (a/f) merupakan balikan kepada nisbah bahan api-udara (f/a) (Edwards, 1974). Oleh itu, perlu disedari walaupun nisbah kesetaraan bagi keduanya pada nilai stoikiometri adalah sama, tetapi pada campuran yang kaya dan cair bahan api nilainya berlainan disebabkan keterbalikannya antara satu sama lain. Ini dapat diterangkan dengan lebih jelas melalui Jadual 3.3.

Jadual 3.3 Perbandingan nisbah kesetaraan (Edwards, 1974).

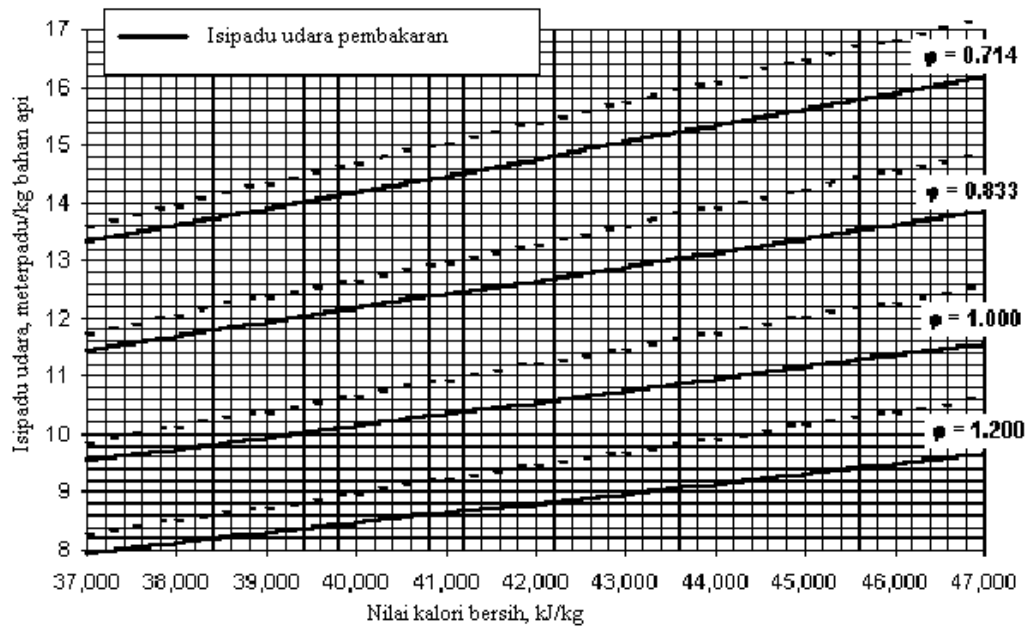
Definisi ϕ	Campuran	Nilai
(f/a)	Kaya	$\phi > 1$
	Stoikiometri	$\phi = 1$
	Cair	$\phi < 1$
(a/f)	Kaya	$\phi < 1$
	Stoikiometri	$\phi = 1$
	Cair	$\phi > 1$

Pengiraan jumlah udara yang diperlukan untuk pembakaran adalah berfungsikan kepada nilai kalori bersih dan nisbah kesetaraan pembakaran. Perhubungan matematik ini untuk pembakaran bahan api cecair diberikan oleh Spiers (1977). Nisbah kesetaraan boleh didefinisikan sebagai:

$$\phi = \frac{\left[\frac{\text{bahan api}}{\text{udara}} \right]_{\text{sebenar}}}{\left[\frac{\text{bahanapi}}{\text{udara}} \right]_{\text{teori}}} \quad (3.1)$$

Jumlah sebenar penggunaan udara semasa pembakaran untuk variasi nisbah kesetaraan diberikan pada Rajah 3.4. Dengan mengambil kira perhubungan ini adalah linear untuk udara bekalan, A dan nilai kalori bersih, C_N . Formula di bawah dapat digunakan untuk sebarang nilai nisbah kesetaraan dan kalori bersih dengan anggaran peratus ralat kurang dari 1%.

$$A = \left(-0.116 + \frac{2.148}{\phi} \right) + \left(3.533 \times 10^{-6} + \frac{1.99 \times 10^{-4}}{\phi} \right) C_N \quad (3.2)$$



Rajah 3.4 Jumlah penggunaan udara pembakaran untuk variasi nisbah kesetaraan, ϕ (Spiers, 1977).

3.5 Pekali discas, C_D dan tekanan statik dinding

Pengujian prestasi isoterma pemusar udara aliran jejarian dilakukan dengan sedikit perubahan pada rig ujikaji. Al-Kabie (1989), menjalankan ujikaji prestasi isoterma pemusar pada kebuk pembakar berdiameter 76mm dan 140mm dan suhu udara masukan 400K dan 600K. Beliau menunjukkan diameter kebuk pembakar dan

suhu udara masukan tidak mempengaruhi nilai pekali discas, C_D . Nilai ini hanya bergantung kepada geometri pemusar. Pengujian ini mengandungi dua fasa iaitu pengujian pemusar sahaja dan dengan penyelitan plat orifis. Prestasi isoterma dikaji dari aspek pekali discas yang dihasilkan oleh pemusar udara. Daripada ujikaji ini nombor pusar dapat dikira dan pemusar dapat dibahagikan kepada dua kategori, pemusar pusaran lemah dan pusaran kuat.

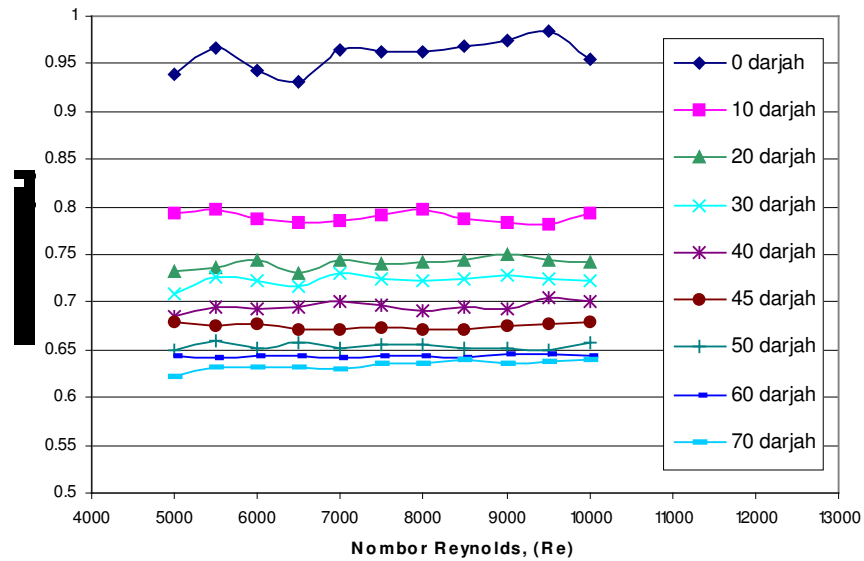
Udara yang dikawal berdasarkan nombor Reynolds dilalukan melalui pemusar dan tiub pembakar bagi melihat kejatuhan tekanan statik dinding di hulu pemusar kepada tekanan atmosfera. Kesemua ujikaji ini dijalankan pada keadaan suhu dan tekanan ambien. Kebuk pembakar yang digunakan berdiameter 140mm dan 400mm panjang. Terdapat tiga variasi diameter plat orifis iaitu 45mm, 40mm dan 35mm. Plat ini diselitkan pada keluaran pemusar berdiameter 50mm bagi melihat prestasi pembakar tanpa dan dengan penyelitan orifis.

Keputusan ujikaji ini diplotkan pada Rajah 3.5 hingga Rajah 3.8. Rajah 3.5 menunjukkan secara umum bahawa nilai pekali discas adalah malar pada semua nombor Reynolds. Ini menunjukkan pekali discas tidak dipengaruhi oleh nombor Reynolds. Pada keadaan semua sudut pemusar tanpa penyelitan plat orifis, pemusar bersudut bilah $0^\circ (S_N=0)$ memberikan nilai C_D yang terbesar dalam lingkungan 0.95. Nilai ini menurun dengan peningkatan sudut bilah pemusar dan sudut bilah pemusar $70^\circ (S_N=1.911)$ memberikan nilai C_D sekitar 0.63. Keadaan menunjukkan pusaran yang tinggi dapat dijana dengan mengurangkan lebar laluan, h pada bilah pemusar.

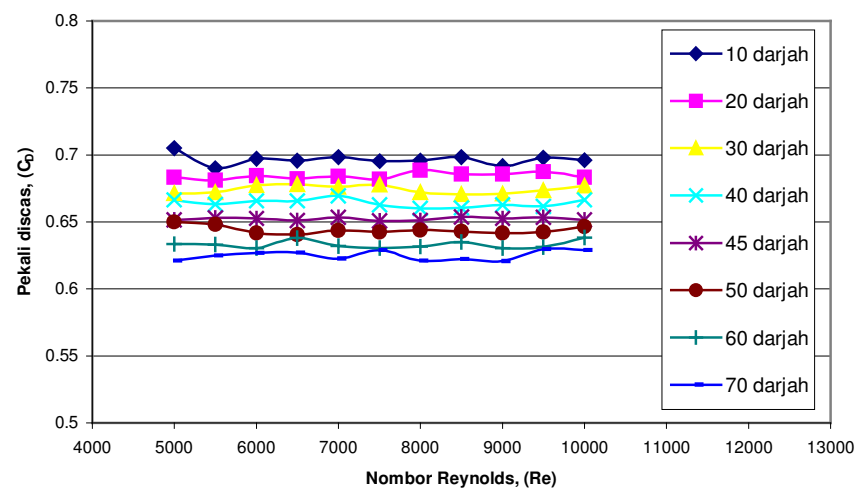
Rajah 3.6 hingga Rajah 3.8 menunjukkan kesan penyelitan variasi diameter plat orifis pada pemusar. Dapat dilihat penyelitan orifis menurunkan nilai pekali discas. Diameter plat yang kecil menampakkan nilai pekali discas, C_D yang rendah di samping merapatkan nilai-nilai tersebut. Nilai C_D yang rendah menunjukkan berlaku pemisahan aliran pada laluan bilah lengkung pemusar.

Rajah 3.6 menunjukkan kesan penyelitan orifis berdiameter 45mm terhadap nilai C_D . Sudut bilah pusar 70° memberikan nilai C_D terendah iaitu 0.623. Nilai C_D maksimum dengan penggunaan plat orifis ini ialah 0.69, dilihat lebih rendah jika dibandingkan ujikaji tanpa plat orifis. Rajah 3.7 dan Rajah 3.8 menunjukkan plot

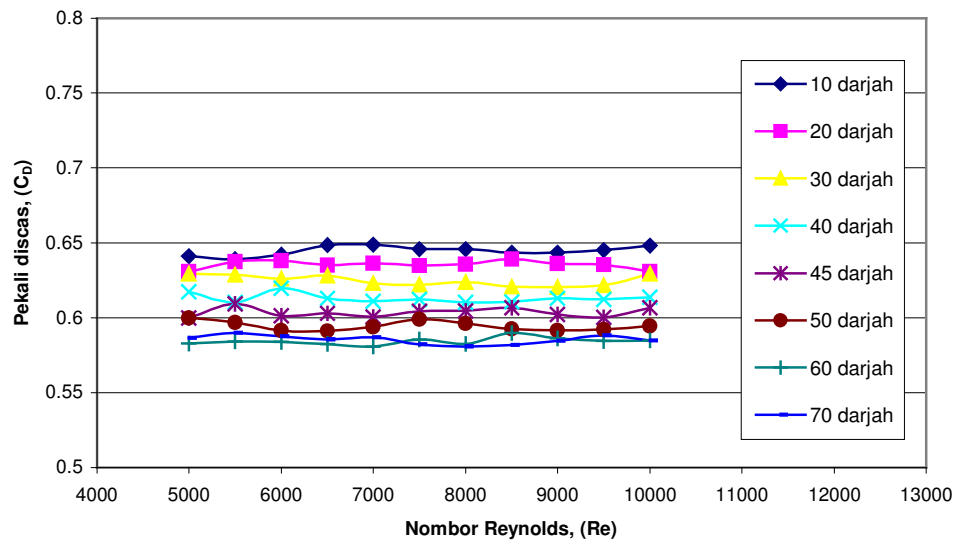
pekali discas, C_D melawan nombor Reynolds dengan penggunaan plat orifis yang berdiameter lebih kecil, 40mm dan 35mm. Dapat dilihat, diameter orifis yang kecil memberikan C_D yang rendah. Pada sudut pusing 10° ($S_N=0.046$), nilai C_D menurun sebanyak 8% untuk penggunaan orifis 35mm dibandingkan dengan orifis 40mm.



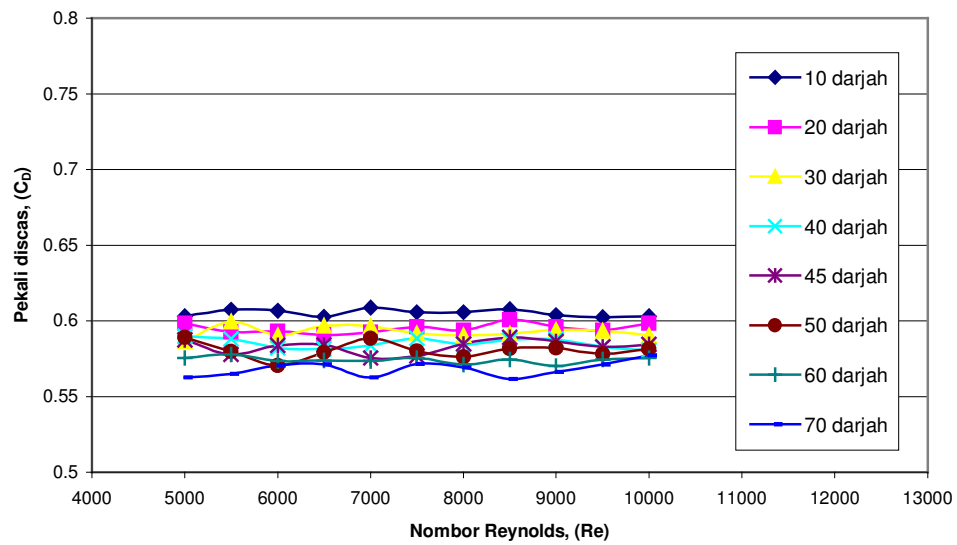
Rajah 3.5 Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar, ujian sejuk



Rajah 3.6 Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan plat orifis 45mm, ujian sejuk



Rajah 3.7 Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan plat orifis 40mm, ujian sejuk



Rajah 3.8 Pekali discas melawan nombor Reynolds pada variasi sudut bilah pemusar dengan plat orifis 35mm, ujian sejuk

3.6 Sistem ujikaji

Pembakar berbahan api cecair digunakan dengan meluas dalam logi industri seperti dandang dan relau, untuk pemanasan langsung atau tidak langsung. Komponen-komponen penting pembakar sektor industri (Williams, 1990) ialah:

- a. Nozel pengabus suntikan untuk menghasilkan semburan.
- b. Pengalir udara yang memasukkan udara dan menentukan corak aliran untuk menggalak percampuran yang baik.
- c. Tekak pembakar yang direka bentuk untuk memastikan pembakaran stabil.
- d. Sistem kawalan untuk pencucuhan dan pengesahan nyalaan.

Sistem ujikaji bagi penyelidikan ini mengandungi komponen-komponen di atas dan direka bentuk mengikut spesifikasi BS 799 (British Standards Institution). Rajah 3.12 di akhir bab ini menunjukkan lukisan skema keseluruhan pembakar berbahan api cecair pada skala makmal. Pembakar ini terdiri dari unit pengagih dari bekalan udara, sistem pemeteran, sistem bekalan dan suntikan bahan api, instrumentasi pada kebuk pembakar dan sistem persampelan gas ekzos.

3.6.1 Sistem bekalan bahan api

Bahan api dibekalkan dari tangki berkapasiti 10 liter menggunakan sistem perpaipan melalui meter kadar alir ke pam nozel pengabus. Kadar bekalan bahan api dikekalkan dengan mengalirkan semula bahan api lebihan ke tangki. Jumlah bahan api yang digunakan ditetapkan pada kadar 3.85 l/jam (1.0 GPH). Komposisi kimia bahan api diesel dan kerosin komersial ditunjukkan seperti Jadual 3.4. Komposisi ini diberikan oleh Makmal Pengujian Petroleum, Unit Perkhidmatan Makmal, Fakulti Kejuruteraan Kimia & Kejuruteraan Sumber Asli, Universiti Teknologi Malaysia.

Kesemua data ini diperlukan semasa mengira kecekapan pembakaran menurut spesifikasi BS 845 (British Standards Institution).

Jadual 3.4 Komposisi kimia bahan api diesel dan kerosin komersial

	Diesel	Kerosin
Pemalar nilai kalori kasar, K1g	0.511	0.450
Peratus teori maksimum CO ₂ , K2	15.71	15.62
Peratus kehilangan kelembapan, K3	5.85	6.00
Peratus kehilangan karbon tak terbakar, K4	48	48
Pemalar nilai kalori bersih, K1n	0.558	0.480
Aras oksigen rujukan, O _{2r}	3.0	3.0
Nilai kalori kasar, Q _{gross} (MJ/kg)	33.96	36.19
Nilai kalori bersih, Q _{net} (MJ/kg)	31.11	33.22
Ketumpatan, ρ (kg/m ³)	0.846	0.788

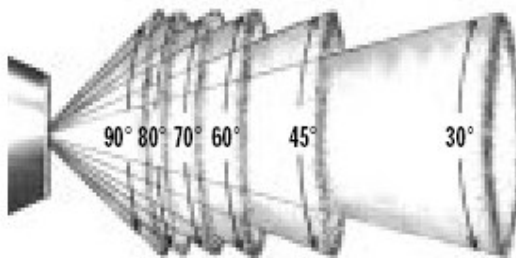
3.6.2 Sistem suntikan bahan api

Pemilihan nozel suntikan bahan api penting dalam menentukan had kestabilan, kadar haba yang dibebaskan dan emisinya. Kadar percampuran yang terlalu tinggi mengakibatkan had kestabilan pembakaran mengecil pada sistem pembakaran pracampur. Jika kadar percampuran terlalu rendah pula, pembakaran menjadi tidak lengkap. Dengan percampuran yang seragam pada semua keadaan, kadar pelepasan haba adalah maksimum tetapi julat pembakaran sempit sedangkan percampuran yang lemah menyebabkan kadar pelepasan haba rendah.

Nozel semburan melaksanakan tiga fungsi penting untuk pembakar berbahan api cecair seperti di bawah (Delavan, 2000):

- a. Agen pengabusan, meningkatkan proses pengewapan untuk memecahkan minyak kepada titisan-titisan halus.
- b. Pemetaran, nozel akan menyalurkan semburan minyak pada amaun yang tetap ke dalam kebuk pembakar.
- c. Pencorakan, nozel akan memberikan semburan minyak pada bentuk dan sudut yang seragam.

Dalam reka bentuk pembakar ini, nozel suntikan kon lompong bersudut 80° keluaran Delavan digunakan kerana sesuai untuk kegunaan pembakar bersaiz kecil (semburan lingkungan 1.0 GPH). Nozel kon lompong ini memberikan sudut dan corak semburan yang stabil. Untuk kebuk pembakaran berbentuk silinder, sudut semburan terbaik adalah dari 70° ke 90° kerana dapat menghasilkan nyalaan yang pendek pada nisbah kesetaraan yang tinggi (Delavan, 2000).



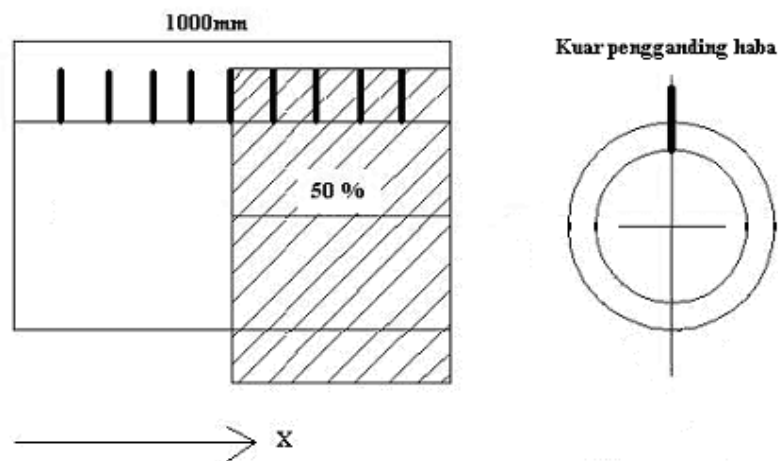
Rajah 3.9 Bentuk semburan bahan api pada pelbagai sudut (Delavan, 2000)

3.6.3 Sistem bekalan udara

Udara dibekalkan pada sistem ujikaji dari sebuah '*ring blower*' yang berkapasiti $27\text{m}^3/\text{jam}$ jenama hitachi dan dibekalkan pada tekanan maksimum 111.1Kpa. Bekalan udara dapat distabilkan pada kejatuhan tekanan kurang dari 9% dengan mengambilkira tiada tekanan balikan di dalam kebuk pembakar. Tiub aliran udara akan melalui meter kadar alir utama yang dikawal dengan injap sehalu. Jumlah udara masuk ke kebuk pembakaran dikawal di sini. Tiub ini dipecahkan kepada empat, dan memasuki kebuk secara paksi pada sudut 90° setiap satu.

3.6.4 Instrumentasi kebuk pembakar

Kebuk pembakar yang berdiameter dalam, D_i 380mm, dipasang dengan kuar pengganding haba Yokogawa *chromel-alumel* jenis *K*. Sebanyak 9 kuar dipasang di kebuk pembakaran berjarak 100mm setiap satu. Kuar ini dipasang hingga ke had dinding kebuk pembakar dan suhu yang diambil adalah suhu dinding pembakar. Sebelum eksperimen dijalankan semua pengganding haba ini akan ditentukan menggunakan air yang dididihkan pada suhu 100°C . Pemasangan pengganding haba ini menurut spesifikasi BS 1041, bahagian 4.

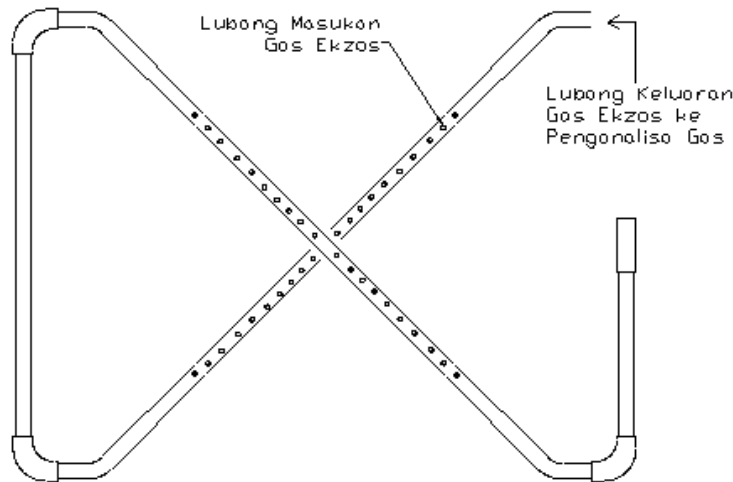


Rajah 3.10 Skema kuar instrumentasi pada kebuk pembakar

3.6.5 Sistem persampelan gas ekzos

Reka bentuk kuar persampelan purata gas adalah sama seperti yang digunakan oleh Lister dan Wedlock (1978) dan Ahmad Suhaimi (1994). Cuma yang menjadi perbezaan adalah kuar ini tidak disejukkan dengan air maka terdapat beberapa perubahan kepada reka bentuk. Kuar ini direka bentuk untuk memastikan sampel yang dihantar ke penganalisis gas adalah perwakilan purata emisi pembakaran. Kuar ini mempunyai 40 lubang bermula dari tengahnya dengan setiap

sisi mempunyai bilangan lubang yang sama. Setiap lubang bersaiz 1.0mm. Kuar persampelan dipasang di hujung kebuk pembakaran.



Rajah 3.11 Skema kuar persampelan 'X' gas ekzos

3.6.6 Sistem penganalisis gas

Penganalisis gas berterusan jenama Kane May model KM9106 digunakan untuk mengesan kehadiran gas seperti oksigen, oksida nitrogen, karbon monoksida, karbon dioksida dan hidrokarbon tidak terbakar dan lain-lain lagi. Proses tentukur secara terperinci dijalankan oleh IPSH GASMASTER SDN. BHD. Jadual tentang julat pengesanan dan kejituan ditunjukkan dalam Jadual 3.5. Penganalisis dipasang kuar emisi tunggal yang akan dipasang kepada pensampel gas ekzos. Terdapat pam sedutan di dalam alat ini yang akan menyedut gas emisi melalui kuar, tiub teflon, rangkaian penapis dan akhir sekali ke penderia gas sebelum keluar ke ekzos analisis. Sebelum gas emisi masuk ke dalam penganalisis, gas ini hendaklah bebas daripada kelembapan, partikel, habuk dan suhu gas tidak boleh melebihi 40°C. Untuk mencapai keadaan itu, tiub teflon yang panjang dipasang dengan dua jenis penapis habuk daripada bahan kertas dan bahan kimia.

Jadual 3.5 Julat pengesanan dan kejituan penganalisa gas

Parameter	Kebezajelasan	Kejituan	Julat
Oksigen (O ₂)	0.1%	±0.2%	0-25%
Karbon monoksida (CO)	1ppm	±20ppm	0-10,000ppm
Karbon dioksida (CO ₂)	0.01%	±1%	0-20%
Nitrogen Oksida (NO)	1ppm	±5ppm	0-1000ppm
Nitrogen dioksida (NO ₂)	5ppm	±5ppm	0-1000ppm
Hidrokarbon (Hc)	1ppm	±5%	0-100,000ppm

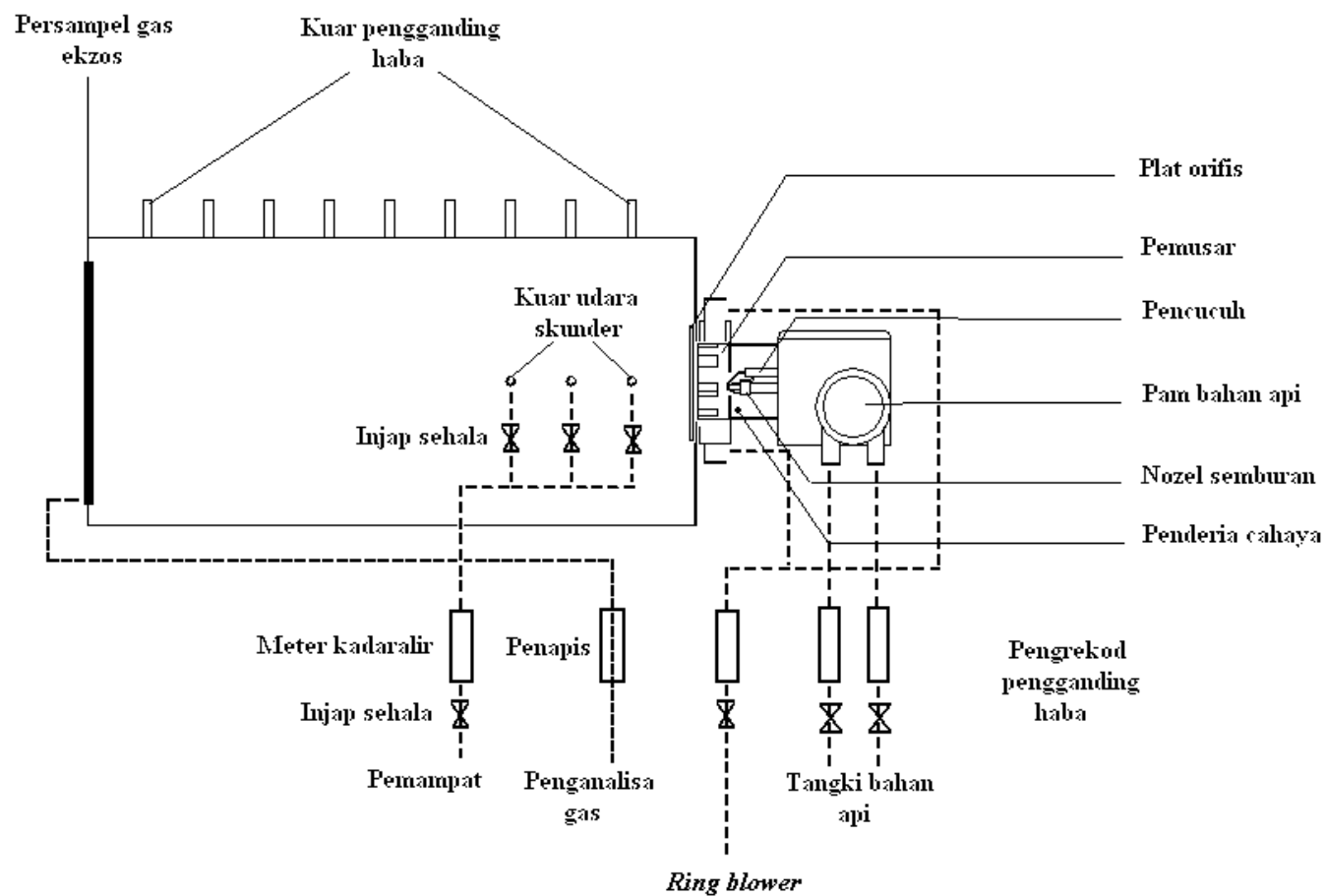
Sebagai langkah keselamatan tambahan terdapat sistem pendinginan sejatan di mana kuar dibalut dengan kain yang basah dan disejukkan lagi menggunakan hembusan kipas. Apabila penganalisis ini dihidupkan, ia akan mengambil masa lima minit untuk proses tentukur secara automatik semua penderia gas di mana kuar perlu didedahkan kepada udara bersih dengan mengambilkira nilai gas emisi dalam bilik adalah sifar dan gas oksigen adalah 20.9%. Proses dilakukan dengan kerap bagi mendapatkan bacaan yang jitu semasa ujikaji. Penganalisis gas juga dipasang dengan sistem penyingkiran kelembapan. Sistem ini perlu untuk memanjangkan tempoh hayat penderia gas jika digunakan untuk tempoh yang lama.

3.7 Prosedur ujian umum

Ujikaji untuk penyelidikan ini terbahagi kepada dua bahagian utama. Prosedur umum untuk semua ujikaji adalah dijalankan seperti di bawah:

1. Penganalisis gas dan pengganding haba dihidupkan 30 minit awal sebelum ujikaji dimulakan bagi menstabilkan sistem elektroniknya.
2. Alatan ujikaji seperti pemusar atau plat orifis dipasang pada pembakar.
3. Kesemua komponen termasuk instrumentasi pada pembakar dipastikan beroperasi dengan baik dan pembakar dipasang lengkap.

4. Alat pengagih udara utama dihidupkan dan udara dibekalkan ke dalam pembakar pada nisbah kesetaraan, $\phi=1.20$. Keadaan ini adalah keadaan udara minimum.
5. Prosedur menghidupkan pembakar seperti di bawah:
 - a. Kipas sistem penyejukan pembakar dihidupkan.
 - b. Kedua-dua injap sehalu bahan api dibuka sepenuhnya.
 - c. Suis pembakar dihidupkan.
 - d. Bahan api akan dipam secara automatik dan suis pencucuh menyala.
 - e. Jika tiada nyalaan dalam tempoh 5 saat, penderia akan menutup sistem bahan api, sistem pencucuhan dan sistem penyejukan secara automatik. Tempoh pengaktifan semula selama 2 minit.
 - f. Api pencucuh akan padam jika nyalaan kekal selama 15 saat.
6. Apabila nyalaan stabil (pemantauan suhu kebulut pembakar), kadar alir udara utama diubah pada kadar yang dikehendaki ($\phi= 1.10, 1.00, 0.8330, 0.7735$ dan 0.7140) dan kadar kenaikan ini adalah secara perlahan sebanyak 5%.
7. Sampel gas ekzos mula direkod ketika suhu kebulut telah stabil. Sebanyak 5 sampel bacaan diambil dan nilai purata sampel dikira.



Rajah 3.12 Skema keseluruhan pembakar berbahan api cecair pada skala makmal

BAB 4

PEMBAKAR BERPEMUSAR ALIRAN JEJARIAN UNTUK PEMBAKARAN RENDAH NO_x

Bahagian ini terdiri daripada keputusan dan perbincangan yang berkaitan dengan ujikaji pembakaran dengan pemusar aliran jejarian pada pembakar berbahan api cecair berskala makmal. Perbincangan difokuskan kepada pengaruh sudut bilah atau dengan kata lain kekuatan pusar terhadap pembentukan emisi NO_x dan emisi-emisi lain pada dua jenis bahan api berbeza; diesel dan kerosin komersial serta perbandingan di antaranya. Ujian pembakaran dijalankan pada tiga keadaan iaitu cair bahan api, stoikiometri dan kaya bahan api.

4.1 Pengenalan

Terdapat permintaan yang tinggi terhadap pembangunan sebuah pembakar yang menghasilkan emisi NO_x yang rendah bagi memelihara alam sekitar ini. Pembakar yang dapat memberikan campuran bahan api udara yang baik pada keadaan nisbah kesetaraan, ϕ di bawah 1.0 pada zon utama dapat mengurangkan pembentukan emisi NO_x (Lefebvre, 1983). Percampuran yang kurang baik akan menyebabkan masalah dari segi awal pencucuhan, kestabilan nyalaan dan kecekapan pembakaran (Kim, 1995).

Keperluan utama pembakar kegunaan industri ialah nyalaan kekal dalam semua keadaan dan dalam tempoh yang lama. Bentuk aliran pada zon utama penting untuk kestabilan nyalaan. Satu kaedah umum untuk meningkatkan kestabilan nyalaan ialah dengan menggunakan aliran pusar di mana aliran haba hasil pembakaran yang panas akan dialirkan semula ke kawasan percampuran bertindak sebagai pemegang nyalaan dan bercampur dengan campuran bahan api udara. Kaedah yang efektif untuk mewujudkan keadaan di atas ialah memasang nozel suntikan bahan api di tengah-tengah kubah pemusar di mana bahan api dan udara akan bercampur (Kim, 1995).

4.2 Kesan penggunaan pemusar aliran jejarian

Ciri-ciri pemusar aliran jejarian bilah lengkung yang mempunyai nombor pusar dari 0.046 hingga 1.911 (sudut bilah 10° hingga 70°) dikaji dari aspek taburan suhu dan pembentukan emisi yang dihasilkan. Nilai ini mengambilkira pusaran lemah (<0.6) dan pusaran kuat (>0.6). Ujikaji dijalankan dengan penggunaan bahan api diesel dan kerosin komersial sebagai melihat perbandingan dan kesamaan bentuk dan ragam pembentukan emisi. Ujikaji dilakukan pada nisbah kesetaraan antara 0.7 hingga 1.2. Emisi yang dibincangkan ialah oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan karbon dioksida (CO_2) serta prestasi pembakaran dari aspek kecekapan pembakaran (η).

4.2.1 Profil taburan suhu

Suhu pembakaran memainkan peranan penting dalam pembentukan emisi kerana ia mempengaruhi pembentukan emisi karbon monoksida, CO dan oksida nitrogen, NO_x . Suhu pembakaran yang tinggi diperlukan untuk mengurangkan

pembentukan CO tetapi akan meningkatkan pembentukan NO_x . Seperkara yang boleh dipertimbangkan untuk mencapai keadaan yang mana emisi NO_x dan CO rendah adalah panjang nyalaan. Nyalaan yang pendek akan menghasilkan suhu yang tinggi pada jarak yang singkat. Selain itu juga peningkatan isipadu nyalaan pada zon utama boleh mengurangkan emisi CO (Lefebvre, 1983).

Rajah 4.1 hingga Rajah 4.3 menunjukkan taburan suhu sepanjang kebuk pembakar pada variasi nisbah kesetaraan, ϕ . Variasi ini terdiri daripada keadaan kaya, stoikiometri dan cair bahan api. Rajah 4.1 menunjukkan profil suhu sepanjang kebuk pembakar pada keadaan kaya bahan api ($\phi=1.10$). Puncak suhu tertinggi ialah lebih kurang 1300K pada jarak 200mm dari masukan pembakar. Puncak profil suhu meningkat dengan peningkatan nombor pusar (SN). Dapat diperhatikan terdapat dua puncak suhu. Puncak pertama pada jarak 300mm dari masukan pembakar iaitu bagi SN=0.046 hingga SN=0.63. Selepas itu, puncak suhu untuk SN=0.780 hingga SN=1.911 ialah pada jarak 200mm dari masukan pembakar dan nilainya lebih tinggi daripada puncak suhu untuk pusaran lemah. Selepas puncak, sama ada bagi pusaran kuat atau pusaran lemah, suhu didapati turun dengan mendadak hingga ke hujung kebuk pembakar. Keadaan ini menunjukkan bahawa pusaran yang kuat memendekkan panjang nyalaan.

Rajah 4.2 dan Rajah 4.3 menunjukkan profil suhu sepanjang kebuk pembakar pada keadaan stoikiometri ($\phi=1.00$) dan cair bahan api ($\phi=0.833$). Puncak suhu pada jarak 200mm dari masukan pembakar pada 1300K untuk SN=1.427 dan 1.911. Fenomena yang sama diperolehi iaitu terdapat dua puncak suhu, satu bagi pusaran lemah dan satu bagi pusaran kuat yang mana nilainya adalah lebih tinggi. Profil taburan suhu ini serupa seperti yang diperolehi oleh Al-Kabie (1989) dan Kim (1995) ketika mereka menjalankan ujikaji menggunakan pemusar udara aliran jejarian tetapi menggunakan bahan api gas. Perbezaan hanyalah kepada nilai suhu pembakaran kerana mereka menggunakan bahan api yang berbeza. Diperhatikan bagi pusaran lemah dan kuat, kenaikan suhu adalah seragam dengan peningkatan nombor pusar. Profil suhu ini menunjukkan zon utama pembakaran hanya sehingga 300mm dari pembakar dan selepas itu adalah zon pencairan. Pusaran yang kuat memberikan nyalaan yang lebih pendek jika dibandingkan dengan pembakaran pusaran lemah.

Escott (1993) juga menunjukkan perkaitan yang sama bagi pusaran kuat dan lemah. Beliau mendapati pusaran kuat mengurangkan jarak panjang api pembakaran dengan menghasilkan percampuran yang pantas berhampiran nozel keluar dan pada sempadan kawasan edaran semula. Selain itu juga kenaikan suhu yang seragam dan tidak berlaku pemadaman pada api nyalaan sepanjang variasi nisbah kesetaraan menunjukkan kestabilan nyalaan di dalam kebuk pembakaran (Fricker dan Leukel, 1976).

4.2.2 Pengaruh nombor pusar, SN terhadap emisi purata pembakar

Rajah 4.4 menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, NO_x berfungisikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk nombor pusar dari 0.046 hingga 1.911. Nombor pusar memberi pengaruh yang besar pada pembentukan emisi NO_x . Pemusar dengan sudut pusar 10° ($\text{SN}= 0.046$) memberikan nilai emisi tertinggi jika dibandingkan dengan pemusar lain, sebanyak 31ppm pada nisbah kesetaraan 0.833. Pada nisbah kesetaraan ini juga nilai emisi adalah tertinggi bagi pemusar-pemusar lain. Selepas itu, profil emisi menurun hingga ke keadaan pembakaran kaya bahan api. Peningkatan nombor pusar menurunkan nilai emisi NO_x . Pemusar 60° ($\text{SN}=1.427$) memberikan profil emisi terbaik dengan puncak emisi pada 23ppm. Selepas itu, emisi NO_x meningkat secara mendadak bagi sudut 70° ($\text{SN}=1.911$) iaitu sebanyak 23% jika dibandingkan dengan nilai terendah bagi pemusar 60° . Perubahan nilai emisi adalah seragam dengan perubahan sudut pusar kecuali pada sudut 70° . Jika diambil $\phi=1.00$ sebagai panduan dan dibandingkan dengan sudut pusaran 10° , terdapat penurunan emisi sebanyak 3%, 11%, 19%, 23% dan 26% untuk pemusar bersudut $20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ dan 60° masing-masing.

Rajah 4.5 menunjukkan pembentukan karbon monoksida, CO berfungisikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk 8 pemusar bernombor pusar dari 0.046 hingga 1.911. Nilai emisi CO meningkat dengan peningkatan nisbah kesetaraan hingga ke kawasan kaya bahan api. Pemusar 10° memberikan nilai emisi yang tertinggi dan mencapai

350ppm pada nisbah kesetaraan, $\phi=1.20$. Sementara itu, nilai emisi semakin menurun dengan peningkatan nombor pusar dan pemusar bersudut 70° memberikan ragam emisi yang rendah, serendah 147ppm pada nisbah kesetaraan, $\phi=0.7$. Jika diambil pada nisbah kesetaraan 1.0, peratus pengurangan maksimum pada pemusar 70° sebanyak 40% diperolehi jika dibandingkan dengan pemusar 10° . Peratusan pengurangan lain adalah sebanyak 38%, 27%, 26%, 23%, 19%, 7% untuk pemusar 60° , 50° , 45° , 40° , 30° dan 20° dibandingkan dengan pemusar bersudut 10° masing-masing.

Rajah 4.6 menunjukkan pelepasan hidrokarbon tidak terbakar (UHC) berfungikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk nombor pusar dari 0.046 hingga 1.911. Nilai emisi UHC meningkat dengan mendadak dengan peningkatan nisbah kesetaraan. Kenaikan ini didapati seragam dari keadaan cair bahan api hingga ke keadaan stoikiometri dan secara eksponen di kawasan kaya bahan api. Pemusar bersudut 10° memberikan bacaan yang tinggi pada sepanjang nisbah kesetaraan dan pemusar bersudut 70° memberikan profil nilai terendah jika dibandingkan dengan pemusar-pemusar lain. Peratus perbezaan (pengurangan) antara kedua pemusar tersebut pada $\phi=0.833$, 1.0 dan 1.1 adalah 78%, 62% dan 74% masing-masing.

Rajah 4.7 menunjukkan peratus pelepasan gas emisi karbon dioksida (CO_2) berfungikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk semua sudut pemusar aliran jejarian. Sudut pusaran memberi pengaruh yang besar pada pembentukan emisi ini. Daripada rajah tersebut didapati emisi CO_2 meningkat secara seragam sepanjang nisbah kesetaraan untuk semua sudut pemusar. Pemusar bersudut 10° memberikan peratus CO_2 tertinggi berbanding dengan pemusar lain. Semakin bertambah sudut pusaran (nombor pusar) didapati peratus pelepasan emisi CO_2 semakin rendah. Jika dilihat pada pemusar bersudut 70° , peratus pengurangan adalah sebanyak 18.2% pada $\phi=1.0$ dibandingkan dengan pemusar bersudut 10° . Peratusan pengurangan lain adalah sebanyak 16.6%, 13.1%, %, 12.1%, 7.6%, 4.0% untuk pemusar 60° , 50° , 45° , 40° , 30° dan 20° masing-masing dibandingkan dengan pemusar bersudut 10° .

Pembentukan emisi daripada pemusar didapati mempunyai profil yang berbeza jika dilihat dari aspek nombor pusar (SN) dan nisbah kesetaraan, ϕ . Jika

dilihat pada Rajah 4.8, peratus kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan (ϕ) untuk nombor pusar dari 0.046 hingga 1.911, didapati kecekapan pembakaran adalah hampir malar untuk semua sudut pusar sepanjang nisbah kesetaraan. Kecekapan pembakaran berada dalam lingkungan 70%-77%.

Kekuatan pusaran didapati mempengaruhi aras pembentukan emisi semasa pembakaran. Semakin tinggi nilai nombor pusar, didapati nilai emisi semakin rendah bagi semua jenis emisi yang dikaji. Api nyalaan juga didapati berwarna biru dan pendek pada pembakaran sudut pusaran 50° ke atas dan nyalaan kuning serta panjang bagi sudut pusaran yang lebih rendah. Ini menunjukkan terdapat kawasan-kawasan pembakaran lengkap berlaku pada nyalaan. Fenomena ini disebabkan penggunaan aliran pusar membantu percampuran bahan api udara dan mempercepatkan pembakaran, seterusnya mengurangkan saiz zon bersuhu tinggi (Beltagui dan Maccallum, 1988). Pemusar bersudut 60° dan 70° memberikan suhu tinggi paling hampir dengan keluaran pemusar. Ini menunjukkan nyalaan kedua-dua pemusar ini lebih pendek berbanding yang lain. Sementara itu, pemusar yang mempunyai kekuatan pusaran lemah (10° hingga 30°) memberikan nyalaan yang lebih panjang. Keadaan ini berkaitan dengan pembaikan yang berlaku untuk percampuran bahan api udara apabila menggunakan sudut bilah yang tinggi. Sudut bilah yang tinggi juga mewujudkan kawasan edaran semula yang besar dan nyalaan yang berdiameter besar seterusnya mengurangkan panjang nyalaan. Pengurangan masa mastautin pembakaran juga dapat dilihat di mana suhu menurun dengan mendadak pada Rajah 4.1 hingga Rajah 4.3 dan ini mengurangkan pembentukan emisi NO_x (Anderson, 1975). Pembentukan emisi NO_x pada Rajah 4.4, adalah minimum bagi pemusar bersudut 60° dan emisi ini meningkat semula pada sudut pusar 70° . Keputusan ini selaras dengan penemuan Al-Kabie (1989) yang mana menggunakan bahan api gas (propana) dan menunjukkan tidak ada kesan yang drastik terhadap emisi NO_x berlaku jika mempelbagaikan sudut bilah pemusar jejarian dari 20° ke 60° . Sementara itu, pusaran yang terlalu kuat, menyebabkan kawasan edaran semula terlalu besar dan suhu di pusat edaran sangat tinggi dan meningkatkan pembentukan NO_x . Keadaan ini juga berlaku pada penyelidikan Mohd Radzi (2002), yang mana pembentukan emisi NO_x meningkat dengan mendadak pada sudut pemusar 70° dan 80° . Bagi emisi-emisi lain, didapati percampuran bahan api udara yang baik dengan

kenaikan nombor pusing dapat mengurangkan pembentukan dan pelepasan bahan cemar tersebut ke udara.

4.3 Perbandingan pembakaran dengan bahan api berbeza

Perbandingan penggunaan bahan api dijalankan untuk melihat sama ada perbezaan bahan api memberi kesan atau tidak terhadap profil pembentukan dan pelepasan emisi ke atmosfera dengan variasi sudut bilah pemutar udara. Perbezaan ini dilihat dari aspek taburan suhu sepanjang pembakar bagi semua sudut bilah pemutar dan perbandingan nilai emisi NO_x , CO, UHC dan CO_2 bagi sudut bilah pemutar 10° (SN= 0.046), 60° (SN=1.427) dan 70° (SN=1.911) masing-masing. Pemutar-pemutar ini dipilih kerana terdapat perbezaan yang ketara semasa pembakaran menggunakan bahan api diesel komersil. Semua ujikaji dijalankan pada nisbah kesetaraan, ϕ antara 0.7 hingga 1.2.

4.3.1 Profil taburan suhu

Rajah 4.9 hingga Rajah 4.11 menunjukkan taburan suhu sepanjang kebuk pembakar pada variasi nisbah kesetaraan, ϕ dengan penggunaan bahan api kerosin. Variasi ini terdiri daripada keadaan kaya, stoikiometri dan cair bahan api. Rajah 4.9 menunjukkan profil suhu sepanjang kebuk pembakar pada keadaan kaya bahan api ($\phi=1.10$). Puncak suhu tertinggi ialah sekitar 1350K pada jarak 200mm dari pembakar. Puncak profil suhu meningkat dengan peningkatan nombor pusing (SN). Dapat diperhatikan terdapat dua puncak suhu. Puncak pertama pada jarak 300mm dari pembakar iaitu bagi SN=0.046 hingga SN=0.63. Selepas itu, puncak suhu untuk SN=0.780 hingga SN=1.911 pada jarak 200mm dari pembakar dan lebih tinggi daripada puncak suhu pusingan lemah. Selepas puncak, suhu didapati turun dengan

mendadak hingga ke hujung kebuk pembakar. Keadaan ini juga menunjukkan pusaran yang kuat memendekkan panjang nyalaan. Rajah 4.10 dan Rajah 4.11 menunjukkan profil suhu sepanjang kebuk pembakar pada keadaan stoikiometri ($\phi=1.00$) dan cair bahan api ($\phi=0.833$) bagi bahan api kerosin. Puncak suhu pada jarak 200mm dari pembakar pada nilai 1340K untuk SN=1.427 dan 1.911.

Daripada Rajah 4.9 hingga Rajah 4.11, didapati profil suhu pembakaran sepanjang kebuk pembakar bagi variasi sudut pemusar (nombor pusar) dan nisbah kesetaraan adalah serupa dengan pembakaran bahan api diesel komersil. Perbezaan hanya dapat dilihat dari aspek nilai suhu yang lebih tinggi berbanding bahan api diesel. Peratus pertambahan suhu juga rendah, hanya lingkungan 3-5% sahaja. Selain itu kenaikan suhu juga seragam dan tidak berlaku pemadaman nyalaan pada semua variasi nisbah kesetaraan dalam pembakaran bahan api ini. Al-Kabie (1989) juga menjalankan ujikaji pembakaran menggunakan bahan api propana dan gas asli untuk pemusar udara bagi melihat perbandingan diantara keduanya. Beliau mendapati tidak terdapat perbezaan yang ketara terhadap profil taburan suhu dengan penggunaan pelbagai bahan api.

4.3.2 Kesan bahan api terhadap emisi purata pembakar

Perbezaan pertama dilihat dari aspek kecekapan pembakaran, (η). Rajah 4.12 menunjukkan kecekapan pembakaran bagi pemusar 10° (SN= 0.046), 60° (SN=1.427) dan 70° (SN=1.911) bagi penggunaan bahan api diesel (D) dan kerosin (K). Dapat dilihat kecekapan pembakaran hampir malar sepanjang nisbah kesetaraan (ϕ). Julat nilai kecekapan pembakaran dalam lingkungan 68-77%. Jika dilihat pada setiap sudut pemusar yang sama, perbezaan kecekapan pembakaran antara penggunaan bahan api diesel (D) dan kerosin (K) adalah kecil. Perbezaan nilai kecekapan hanya 2% bagi pemusar bersudut 10° pada nisbah kesetaraan, $\phi=1.0$.

Rajah 4.13 menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, NO_x berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ pada tiga sudut pemusar, 10° , 60° dan 70° . Profil pembentukan emisi oksida ini didapati serupa bagi kedua-dua bahan api. Pembakaran bahan api kerosin didapati menghasilkan pembentukan emisi yang lebih tinggi berbanding bahan api diesel pada sudut pusaran dan nisbah kesetaraan yang sama. Peningkatan ini dapat dilihat pada semua bilah pemusar. Perbezaan yang paling ketara pada pemusar bersudut 70° di mana dengan perbezaan penggunaan bahan api, peratus peningkatan sebanyak 22% pada nisbah kesetaraan 1.0.

Rajah 4.14 menunjukkan pembentukan karbon monoksida, CO berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ pada tiga sudut pemusar, 10° , 60° dan 70° . Nilai emisi CO meningkat dengan peningkatan nisbah kesetaraan hingga ke kawasan kaya bahan api. Profil yang diperolehi adalah serupa bagi kedua-dua jenis bahan api. Daripada graf, didapati bahan api kerosin memberikan nilai bacaan yang lebih rendah pada semua pemusar dan sepanjang nisbah kesetaraan. Jika diambil pemusar bersudut 10° ($\text{SN}=0.046$), pengurangan sebanyak 10% diperolehi oleh pembakaran bahan api kerosin pada nisbah kesetaraan 1.0. Pemusar-pemusar bersudut lain juga menunjukkan keadaan yang serupa dan peratusnya kecil.

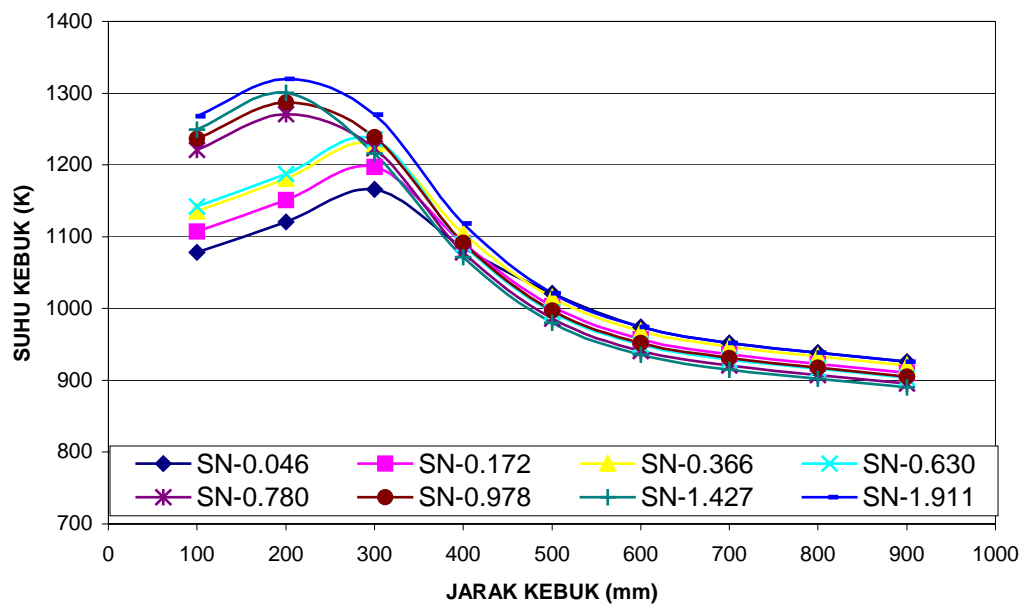
Rajah 4.15 menunjukkan pelepasan hidrokarbon tidak terbakar (UHC) berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk nombor pusar 10° ($\text{SN}=0.046$), 60° ($\text{SN}=1.427$) dan 70° ($\text{SN}=1.911$) bagi bahan api diesel (D) dan kerosin (K). Nilai emisi UHC juga meningkat dengan mendadak dengan peningkatan nisbah kesetaraan. Kenaikan ini didapati seragam dari keadaan cair bahan api hingga ke keadaan stoikiometri dan secara eksponen di kawasan kaya bahan api. Penggunaan bahan api yang berbeza masih memberi profil taburan emisi yang sama untuk graf UHC. Nilai yang diperolehi juga didapati agak rapat antara pemusar-pemusar. Pemusar bersudut 10° , masih memberikan nilai tertinggi jika dibandingkan dengan pemusar lain.

Rajah 4.16 menunjukkan pelepasan karbon dioksida (CO_2) berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk nombor pusar 10° , 60° dan 70° bagi bahan api diesel (D) dan kerosin (K). Nilai emisi CO_2 meningkat dengan peningkatan nisbah kesetaraan dari kawasan cair hingga ke kawasan kaya bahan api. Profil yang diperolehi adalah

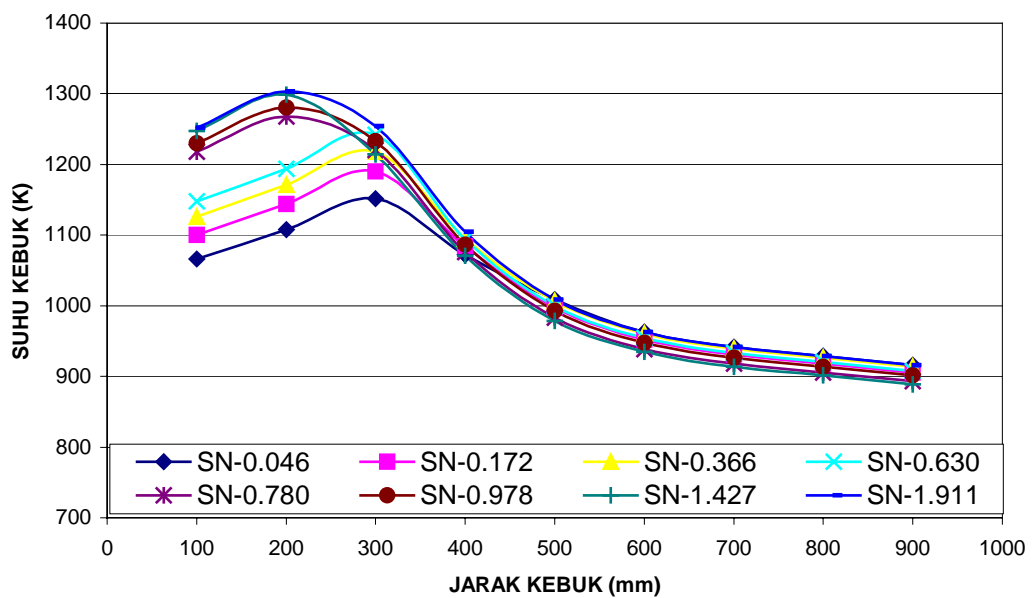
serupa bagi kedua-dua jenis bahan api. Daripada graf, didapati bahan api kerosin memberikan nilai bacaan yang lebih tinggi pada semua pemusar dan sepanjang nisbah kesetaraan. Ini menunjukkan pembakaran bahan api kerosin lebih baik daripada diesel kerana lebih banyak CO ditukarkan kepada CO₂. Keadaan ini bersesuaian dengan Rajah 4.14, di mana nilai emisi CO didapati lebih rendah bagi kerosin jika dibandingkan dengan pembakaran diesel.

Penggunaan bahan api yang berbeza, diesel dan kerosin bagi pembakaran pemusar aliran jejarian secara keseluruhannya memberikan profil bacaan yang serupa dari aspek emisi (NO_x, CO, UHc dan CO₂) dan prestasi (η). Perbezaan hanya dapat dilihat pada nilai emisi yang diberikan. Keputusan yang diperolehi ini selaras dengan penemuan Al-Kabie (1989) dan Kim (1995). Mereka menyimpulkan penggunaan bahan api berbeza menunjukkan pelepasan emisi yang hampir serupa dari segi taburan dan profil. Jika dibandingkan antara pembakaran bahan api cecair dan gas, pembakaran bahan api gas jika tidak ada masalah yang besar semasa pembakaran seperti masalah pengabusan dan percampuran bahan api udara. Al-Kabie (1989) menjalankan penyelidikan pada variasi sudut pemusar aliran jejarian 20°, 30°, 45°, 60°, 70° dengan nisbah d/D bersamaan 0.598. Sementara itu Kim (1995) menggunakan pemusar yang mempunyai nisbah d/D bersamaan 0.520 dan mempelbagaikan ketebalan bilah pemusar aliran jejarian dengan penggunaan pemusar bersudut 45°.

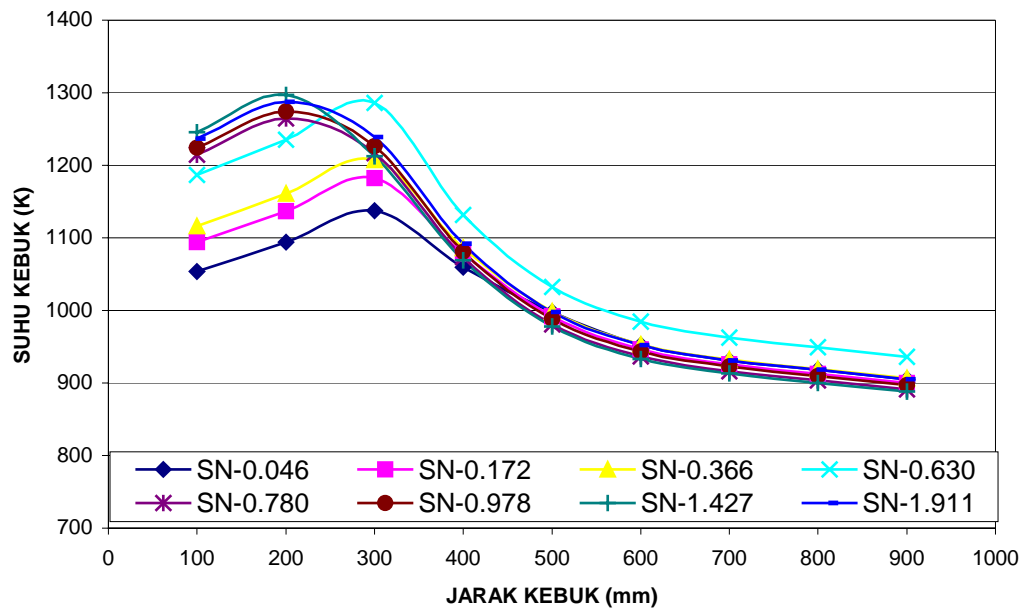
Pembakaran pemusar aliran jejarian didapati dipengaruhi oleh perubahan nombor pusar (SN) dan nisbah kesetaraan (ϕ). Ini menunjukkan faktor geometri sesuatu pemusar seperti tebal bilah, sudut bilah dan nisbah diameter tekak pemusar kepada diameter luar (d/D) penting dalam mengubah kecekapan aliran udara untuk bercampur dengan bahan api sebelum pembakaran. Percampuran yang baik dapat mengurangkan pembentukan dan pelepasan emisi ke udara.



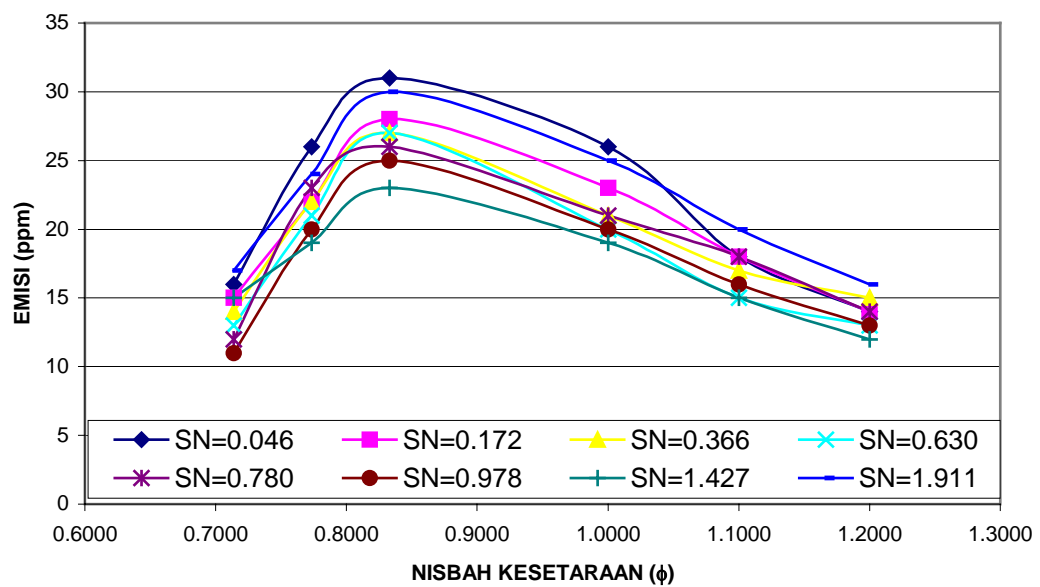
Rajah 4.1 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: diesel



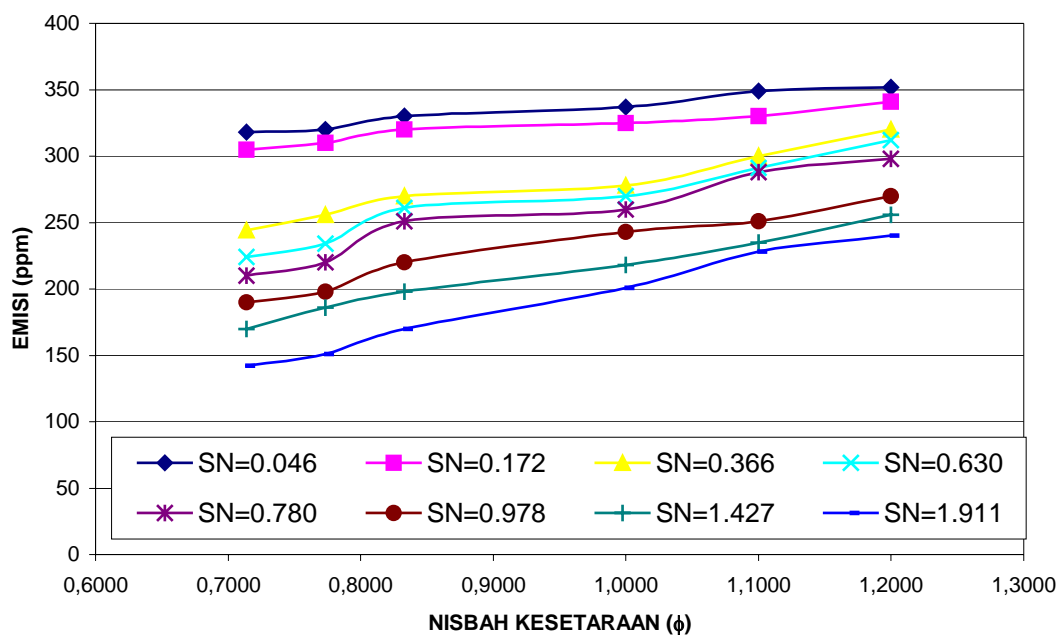
Rajah 4.2 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: diesel



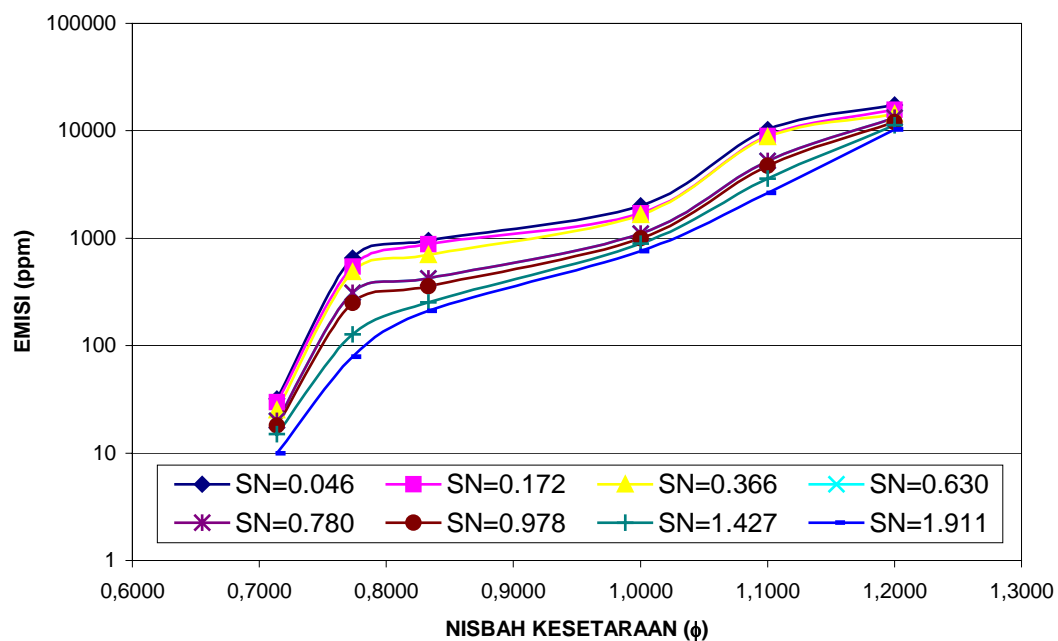
Rajah 4.3 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: diesel



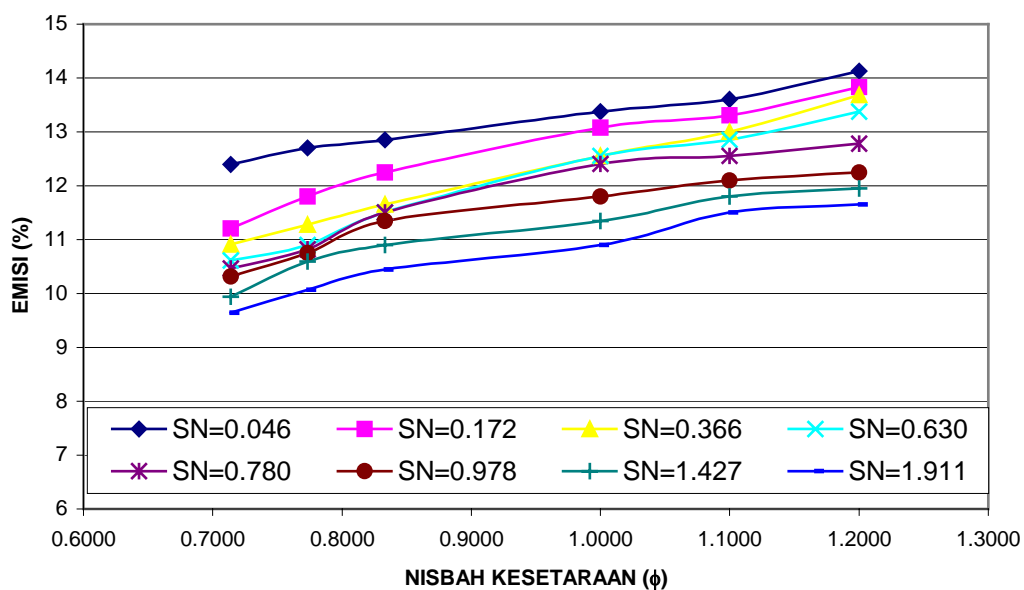
Rajah 4.4 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel



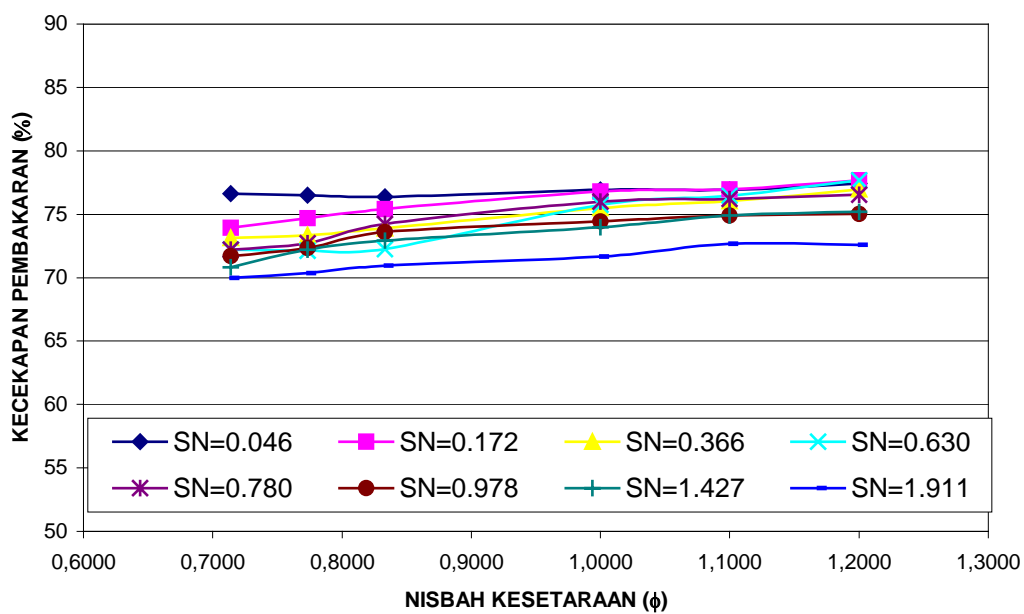
Rajah 4.5 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel



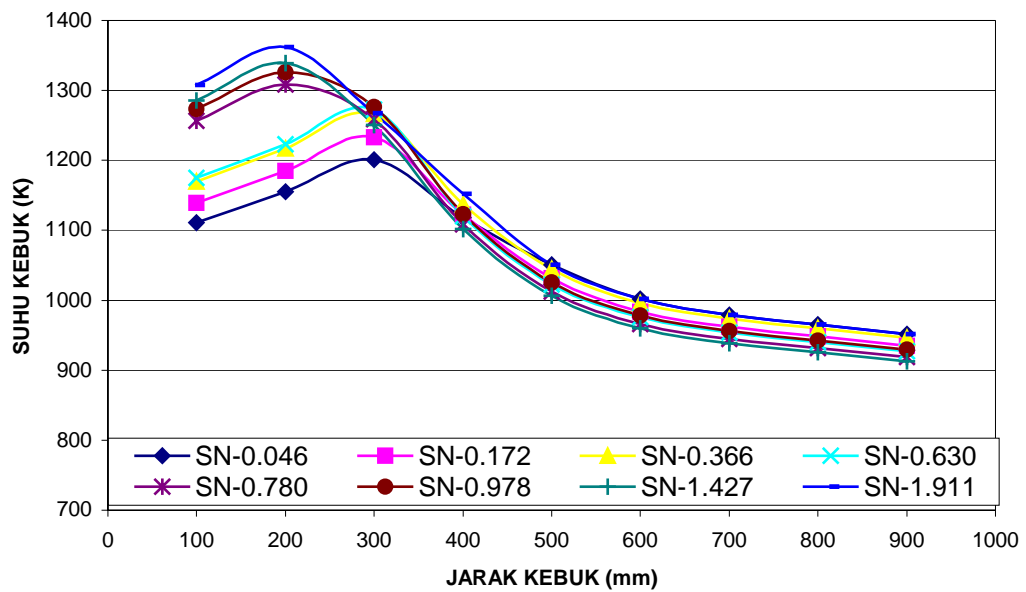
Rajah 4.6 Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel



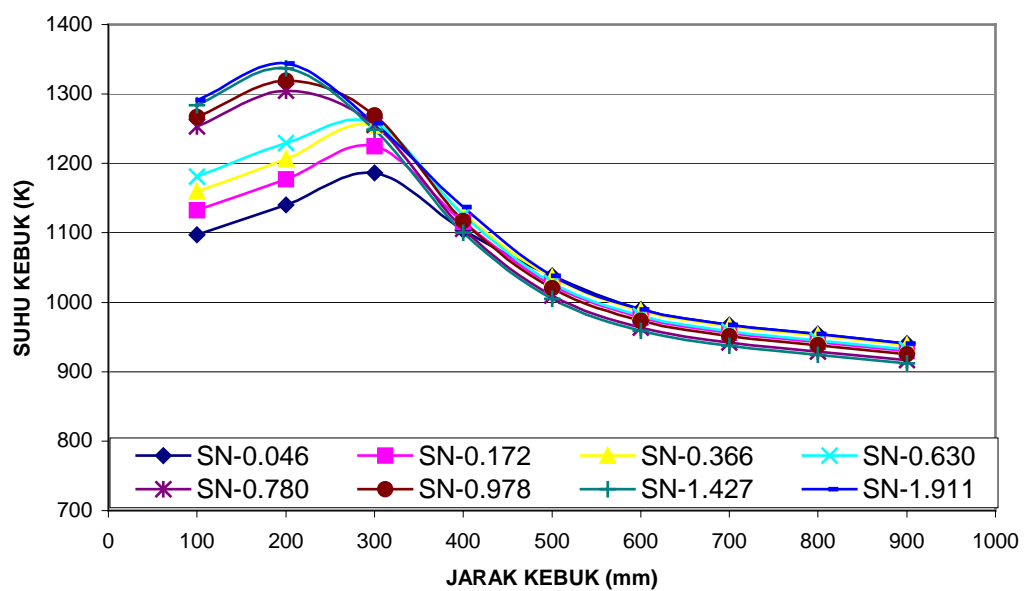
Rajah 4.7 Emisi karbon dioksida (CO₂) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel



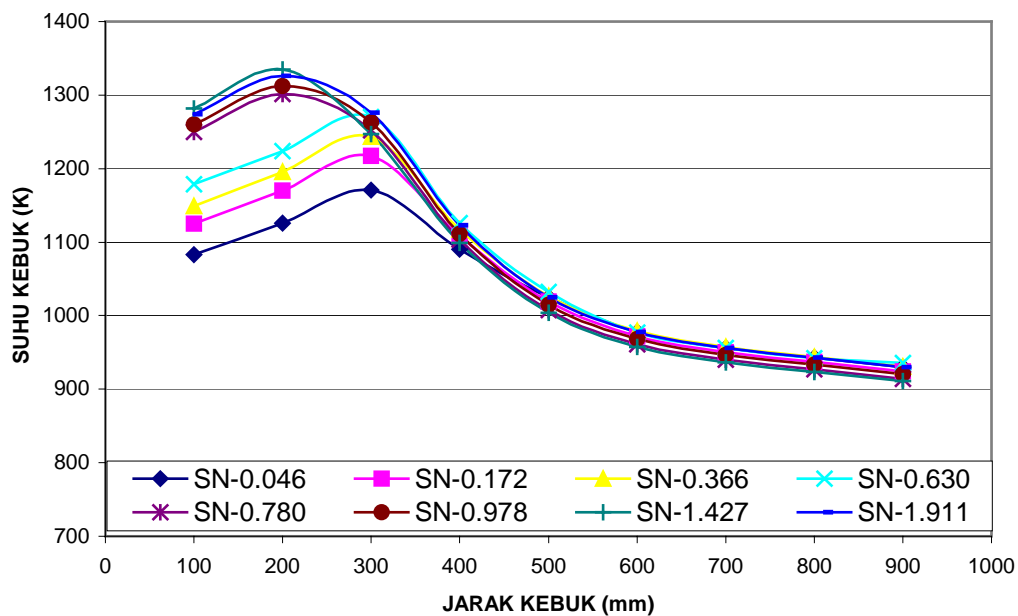
Rajah 4.8 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel



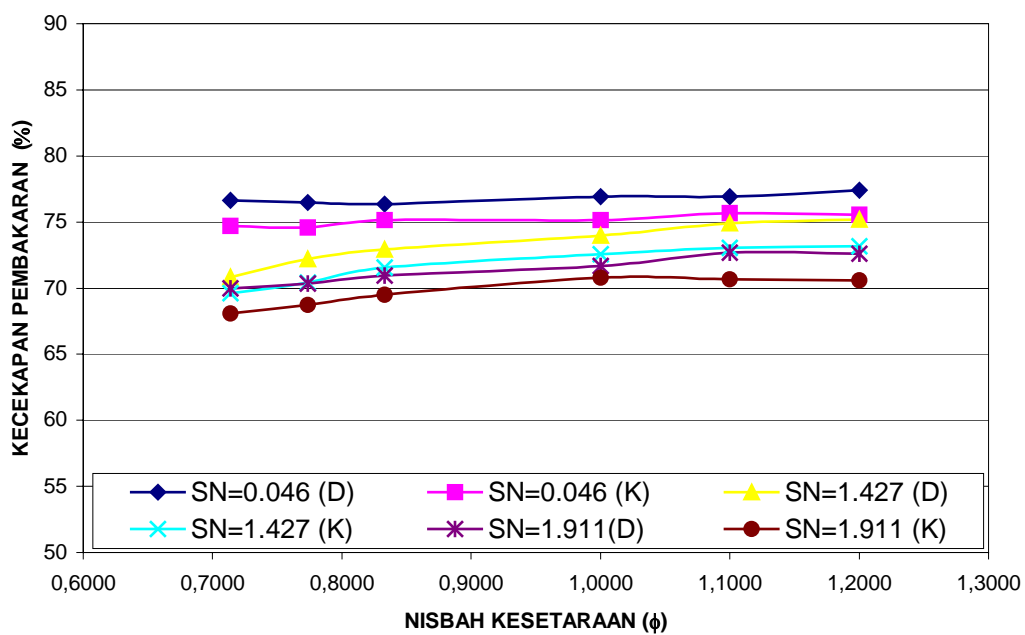
Rajah 4.9 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.10$, bahan api: kerosin



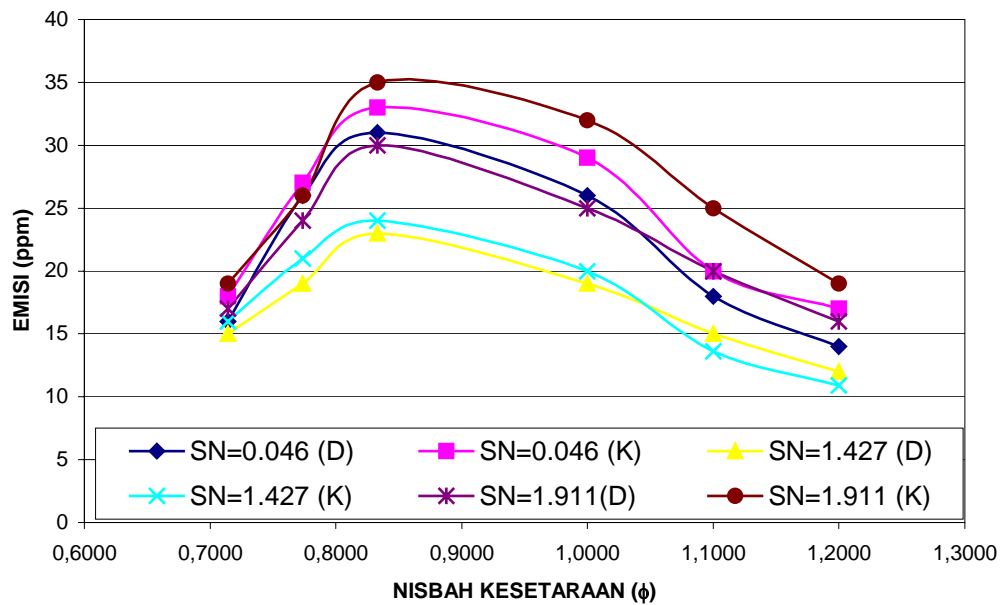
Rajah 4.10 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=1.00$, bahan api: kerosin



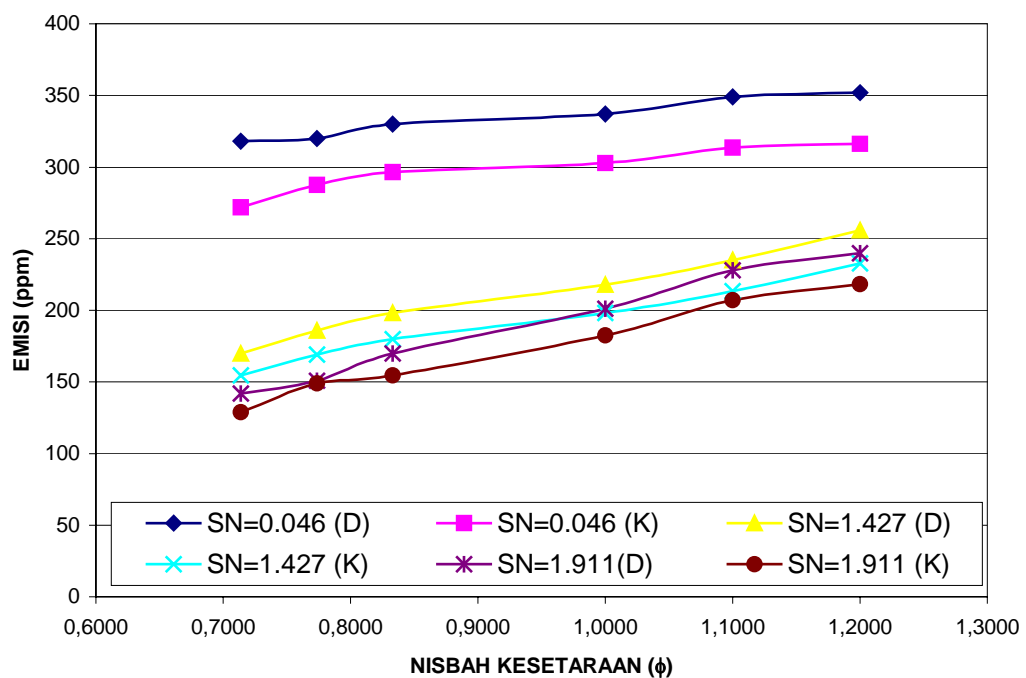
Rajah 4.11 Profil suhu kebuk pembakar, $\phi=0.833$, bahan api: kerosin



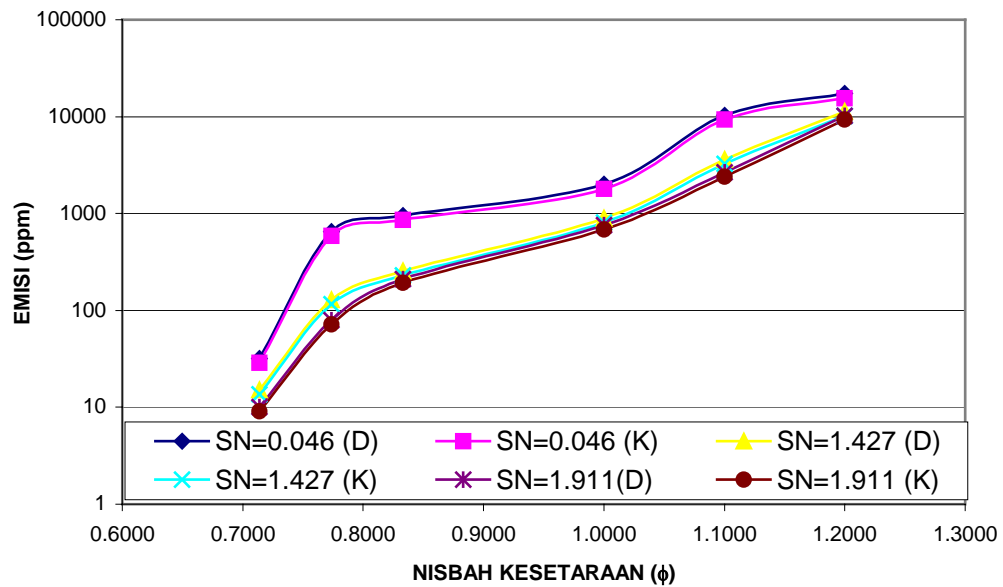
Rajah 4.12 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)



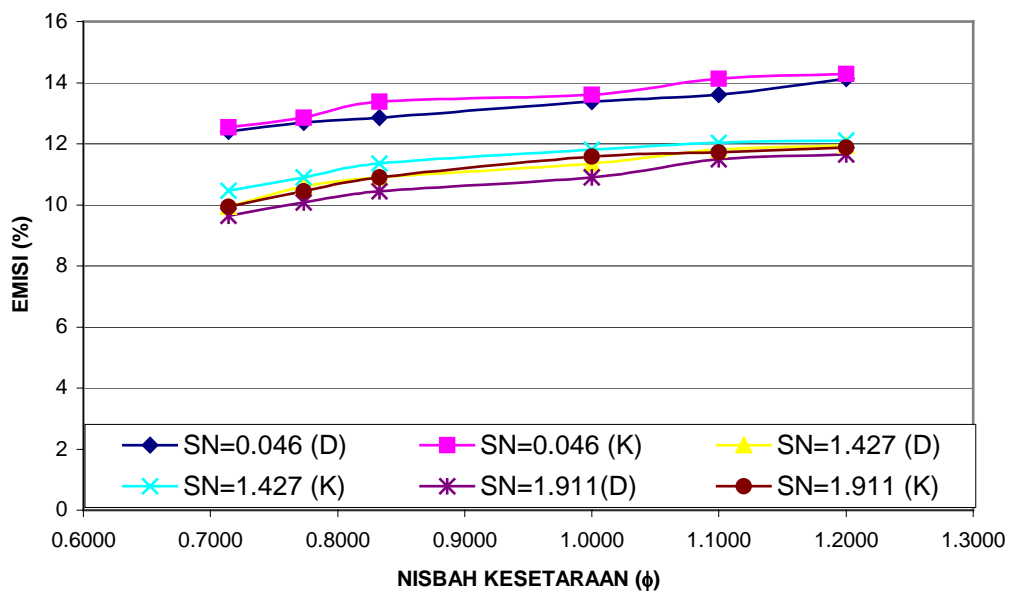
Rajah 4.13 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)



Rajah 4.14 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)



Rajah 4.15 Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)



Rajah 4.16 Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ), bahan api: diesel (D) dan kerosin (K)

BAB 5

PRESTASI PEMBAKAR BERPEMUSAR ALIRAN JEJARIAN : KESAN PENYELITAN ORIFIS

Bab ini terdiri daripada keputusan ujikaji dan perbincangan yang berkaitan dengan ujikaji pembakaran dengan pemusar aliran jejarian pada pembakar berbahan api cecair berskala makmal dengan kaedah penyelitan plat orifis. Perbincangan difokuskan kepada saiz orifis dan pengaruh sudut bilah terhadap pembentukan emisi NO_x dan emisi-emisi lain. Ujian pembakaran dijalankan pada tiga keadaan untuk kaedah penyelitan plat orifis iaitu cair bahan api, stoikiometri dan kaya bahan api.

5.1 Pengenalan

Di dalam sistem pembakaran yang mementingkan penghasilan emisi yang rendah, percampuran udara bahan api yang baik memerlukan aras aliran gelora yang tinggi dan kaedah ini boleh dicapai menerusi kejatuhan tekanan pembakar. Sama ada kehilangan tekanan ini dijana oleh sistem aliran jet atau sistem aliran pusar, aerodinamik aliran masukan ke dalam pembakar menjana lapisan ricih yang mana membentuk gelora. Dalam reka bentuk pembakar aliran pusar lazim, aliran gelora dijana berhampiran pusat zon edaran semula dan ianya tidak digunakan sepenuhnya pada kecekapan yang tinggi (Kim, 1995). Oleh itu pembakar direka bentuk untuk mencapai kestabilan nyalaan dan kawalan proses percampuran udara bahan api yang

lebih baik. Penyelitan plat orifis pada keluaran pemusar adalah satu kaedah yang boleh digunakan. Penyelitan orifis ini akan mewujudkan satu peringkat kehilangan tekanan utama pada keluaran pemusar lebih tinggi berbanding keadaan geometri bilah sahaja (Miller, 1998). Selain itu, penyelitan ini akan mengelakkan bahan api masuk semula ke ruang tekak pemusar akibat edaran semula oleh aliran pusar.

5.2 Kesan penyelitan plat orifis pada pemusar aliran jejarian

Plat orifis dipasang pada muka keluaran pemusar udara yang mempunyai nombor pusar 0.780 dan 1.427 (45° dan 60°). Pemilihan pemusar bersudut 45° bagi melihat dan membanding profil/ragam keputusan dengan penyelidik terdahulu serta nombor pusar ini adalah dianggap permulaan kepada pusaran kuat yang menjana aliran edaran semula gas panas kembali ke dalam kawasan percampuran udara bahan api dan pemusar bersudut 60° kerana memberikan prestasi keseluruhan yang terbaik dalam bab sebelum ini dalam pembakaran yang menggunakan bahan api yang berbeza berbanding pemusar lain. Terdapat tiga saiz diameter orifis (45mm, 40mm dan 35mm) digunakan bagi ujikaji bahagian ini. Nisbah luas orifis iaitu nisbah luas orifis kepada luas tekak pemusar ialah 0.9, 0.8 dan 0.7 bagi orifis 45mm, 40mm dan 35mm dan 1.0 bagi pemusar tanpa orifis. Ujikaji dijalankan dengan penggunaan bahan api diesel bagi melihat ragam pembentukan emisi. Ujikaji dilakukan pada nisbah kesetaraan antara 0.7 hingga 1.2. Emisi yang dibincangkan ialah oksida nitrogen (NO_x), karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan karbon dioksida (CO_2) serta prestasi pembakaran dari aspek kecekapan pembakaran (η).

5.2.1 Pengaruh penyelitan orifis terhadap emisi purata pembakar

Rajah 5.1 menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, NO_x berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 45° (SN=0.780). Penyelitan plat orifis pada tekak pemusar memberikan pengaruh yang besar pada pembentukan emisi NO_x . Profil pembentukan emisi masih serupa seperti pembakaran tanpa penyelitan. Dapat dilihat pembentukan emisi berkurang dengan pengecilan diameter plat orifis. Ragam pembentukan juga dilihat seragam. Kesan ini diperolehi sepanjang nisbah kesetaraan, ϕ yang digunakan. Jika diambil pada nisbah kesetaraan 0.833, pengurangan emisi NO_x sehingga 20% diperolehi dengan penyelitan orifis berdiameter 35mm jika dibandingkan tanpa penyelitan plat orifis.

Rajah 5.2 menunjukkan pembentukan oksida nitrogen, NO_x berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut lebih besar iaitu 60° . Perubahan sudut bilah dengan penyelitan plat orifis pada tekak pemusar memberikan pengaruh kepada emisi dan profil pembentukan emisi masih serupa seperti pembakaran tanpa penyelitan. Jika diambil pada nisbah kesetaraan 0.833, pengurangan emisi NO_x sehingga 22% diperolehi dengan penyelitan orifis berdiameter 35mm jika dibandingkan tanpa penyelitan plat orifis. Jika dibandingkan Rajah 5.1 dan Rajah 5.2, didapati puncak nilai emisi bagi penyelitan orifis berdiameter 35mm untuk kedua-dua rajah berlaku pada nisbah kesetaraan 0.833 dan pemusar 45° memberikan bacaan lebih tinggi sehingga 21ppm jika dibandingkan dengan pemusar 60° hanya 18ppm.

Rajah 5.3 menunjukkan pembentukan karbon monoksida, CO berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 45° . Nilai emisi CO meningkat dengan peningkatan nisbah kesetaraan hingga ke kawasan kaya bahan api. Bentuk kenaikan adalah seragam untuk semua penyelitan orifis. Penyelitan orifis berdiameter 35mm memberikan profil emisi terendah sepanjang nisbah kesetaraan. Jika dibandingkan dengan pemusar tanpa penyelitan plat orifis, pengurangan emisi CO adalah sebanyak 24% dan diperolehi pada nisbah kesetaraan 0.833.

Rajah 5.4 menunjukkan pembentukan karbon monoksida, CO berfungsi nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 60° . Nilai emisi CO juga meningkat dengan peningkatan nisbah kesetaraan hingga ke kawasan kaya bahan api. Bentuk kenaikan adalah serupa untuk semua penyelitan orifis seperti Rajah 5.3. Penyelitan orifis berdiameter 35mm masih memberikan profil emisi terendah sepanjang nisbah kesetaraan. Jika dibandingkan dengan pemusar tanpa penyelitan plat orifis, pengurangan emisi CO untuk pemusar ini adalah sebanyak 20% dan diperolehi pada nisbah kesetaraan 0.833. Penyelitan orifis pada pemusar boleh dikatakan memberikan profil pembentukan yang serupa tetapi nilai emisi yang dihasilkan adalah kurang. Pemusar 45° (Rajah 5.3) memberikan bacaan lebih tinggi sehingga 252ppm jika dibandingkan dengan pemusar 60° (Rajah 5.4) hanya 221ppm.

Rajah 5.5 menunjukkan pelepasan hidrokarbon tidak terbakar (UHC) berfungsi nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 45° . Nilai emisi UHC meningkat secara mendadak dengan peningkatan nisbah kesetaraan dan menjadi kritikal apabila $\phi=1.0$. Kenaikan ini didapati seragam pada pemusar sama ada dengan penyelitan atau tanpa penyelitan orifis dari keadaan cair bahan api hingga ke keadaan stoikiometri dan secara eksponen di kawasan kaya bahan api. Kadar kenaikan emisi UHC tidak dapat dibuat perbandingan kerana profil yang diberikan sangat rapat di antara satu dengan yang lain. Ini menunjukkan tidak terdapat perbezaan yang nyata terhadap kesan penyelitan plat orifis atau tanpa plat orifis.

Rajah 5.6 menunjukkan pelepasan hidrokarbon tidak terbakar (UHC) berfungsi nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 60° . Profil emisi yang terbentuk adalah serupa dengan Rajah 5.5 di mana nilai emisi UHC meningkat secara mendadak dengan peningkatan nisbah kesetaraan dan menjadi kritikal apabila $\phi=1.0$ dan kenaikan ini didapati seragam pada pemusar sama ada dengan penyelitan atau tanpa penyelitan orifis dari keadaan cair bahan api hingga ke keadaan stoikiometri dan secara eksponen di kawasan kaya bahan api. Perbandingan juga tidak dapat dibuat kerana profil yang diberikan sangat rapat di antara satu dengan yang lain. Ini menunjukkan tidak terdapat perbezaan yang nyata

terhadap kesan penyelitan plat orifis atau tanpa plat orifis pada pemusar terhadap emisi UHc. Perbezaan yang dapat dibuat hanyalah berdasarkan nilai bacaan yang diperolehi oleh pembakaran bagi kedua-dua pemusar ini.

Rajah 5.7 menunjukkan peratus pelepasan gas emisi karbon dioksida (CO_2) berfungsikan nisbah kesetaraan, ϕ untuk pelbagai diameter orifis pada pemusar bersudut 45° . Daripada rajah tersebut didapati emisi CO_2 meningkat secara seragam sepanjang nisbah kesetaraan untuk semua sudut pemusar. Bentuk kenaikan adalah seragam untuk semua saiz orifis. Penyelitan plat orifis di hadapan pemusar meningkatkan penghasilan gas CO_2 untuk semua saiz orifis. Penghasilan gas ini juga didapati hampir rapat jika dibandingkan dengan pembakaran tanpa penyelitan orifis. Jika dibandingkan dengan pemusar tanpa penyelitan plat orifis, peningkatan emisi CO_2 adalah sebanyak 5% dan diperolehi pada nisbah kesetaraan 0.833.

Penghasilan gas karbon dioksida (CO_2) bagi pemusar bersudut 60° yang diselitkan dengan variasi diameter plat orifis juga mempunyai profil yang serupa dengan pemusar bersudut 45° . Hal ini dapat dilihat pada Rajah 5.8. Nilai emisi ini meningkat dengan pertambahan nisbah kesetaraan, ϕ . Pembakaran tanpa penyelitan orifis memberikan bacaan emisi CO_2 yang lebih rendah jika dibandingkan pembakaran dengan penyelitan plat orifis. Penyelitan ketiga-tiga plat ini memberikan bacaan yang hampir serupa sepanjang keadaan pembakaran. Ini menunjukkan saiz orifis tidak memberi kesan yang besar terhadap pembentukan emisi CO_2 seperti mana dilihat pada pemusar bersudut 45° dan 60° . Penghasilan didapati lebih tinggi bagi pemusar bersudut 45° di mana nilai emisi menjangkau ke 13% pada keadaan kaya bahan api jika dibandingkan dengan pemusar bersudut 60° .

Pembentukan emisi daripada pemusar yang diselitkan dengan plat orifis dari pelbagai saiz didapati mempunyai profil yang hampir serupa jika dilihat dari aspek nombor pusar (SN) dan nisbah kesetaraan, ϕ . Perbezaan yang ketara hanya dapat dilihat pada nilai emisi yang dihasilkan. Jika dilihat pada Rajah 5.9 dan Rajah 5.10, peratus kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan (ϕ) untuk pemusar bersudut 45° dan 60° dengan penyelitan plat orifis didapati adalah hampir malar untuk semua keadaan sama ada dengan penyelitan orifis atau tidak untuk semua

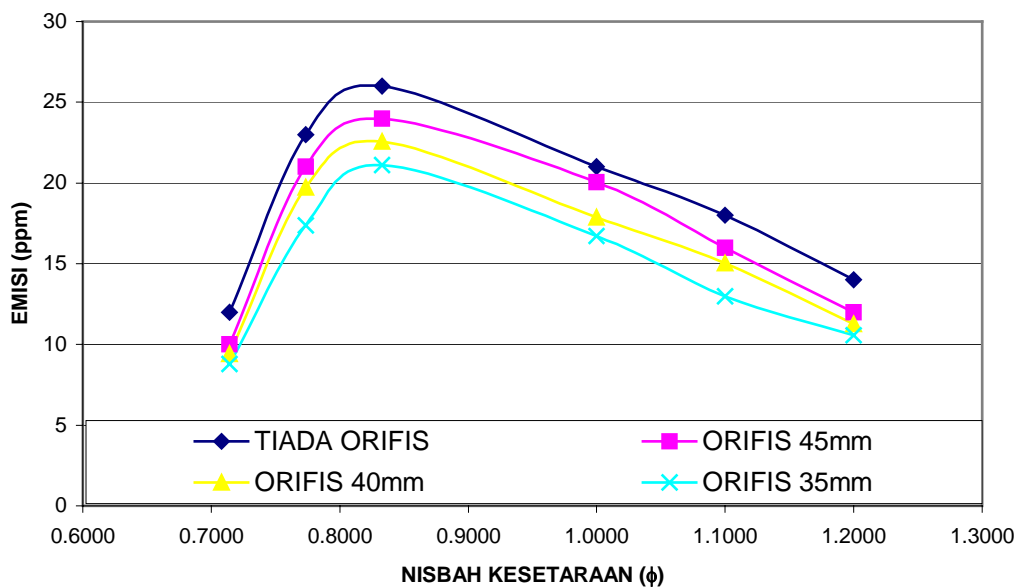
nisbah kesetaraan. Dapat diperhatikan pada kedua-dua graf tersebut, pembakaran tanpa penyelitan memberikan nilai kecekapan pembakaran terendah. Kecekapan pembakaran dengan penyelitan orifis pula lebih tinggi dan berada dalam lingkungan 76%-83%.

5.2.2 Ulasan pembakaran dengan penyelitan plat orifis

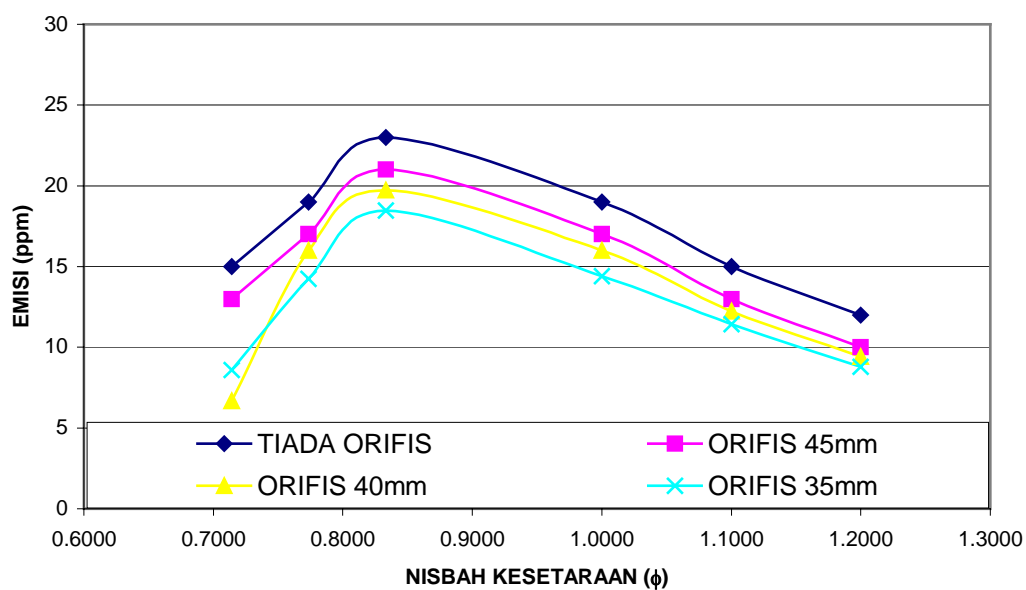
Daripada keputusan yang diperolehi, didapati penyelitan plat orifis memberikan kesan terhadap pembentukan emisi NO_x dan emisi-emisi lain seperti karbon monoksida (CO), hidrokarbon tidak terbakar (UHC) dan karbon dioksida (CO_2) serta prestasi pembakaran dari aspek kecekapan pembakaran (η). Penyelitan plat orifis yang mempunyai nisbah luas orifis 0.7 memberikan keputusan emisi pembakaran yang terbaik berbanding nisbah luas orifis 1.0 hingga 0.8. Keputusan ini menunjukkan penyelitan plat orifis berdiameter lebih kecil pada tekak pemusar membantu meningkatkan kejatuhan tekanan keluaran pemusar yang mana boleh memaksimumkan lapisan ricih gelora yang membantu percampuran antara udara dan bahan api. Penggunaan orifis yang mempunyai nisbah luas orifis yang besar menghasilkan rantau atau kawasan kaya bahan api berhampiran nozel semburan bahan api yang menjana emisi yang lebih tinggi. Nisbah luas orifis yang kecil membantu mengelakkan bahan api masuk semula ke kawasan edaran semula yang menghasilkan zon kawasan kaya bahan api (Kim, 1995). Orifis yang bernisbah luas kecil menambah kebolehcampuran berbanding nisbah luas yang besar sesuai dengan pembaikan percampuran di hulu pemusar. Ini sekali lagi menunjukkan percampuran yang baik menghasilkan pembentukan emisi yang rendah disebabkan nisbah luas yang kecil menjana aliran pusar yang lebih tinggi berbanding penggunaan pemusar sahaja.

Kim (1995), telah menjalankan ujikaji pembakaran pada pemusar udara aliran jejarian bersudut 45° dengan penyelitan plat orifis yang mempunyai nisbah luas orifis 0.776 menggunakan gas asli sebagai bahan api. Beliau menunjukkan bahawa penggunaan bahan api ini masih memberikan hasil pembakaran beremisi yang lebih

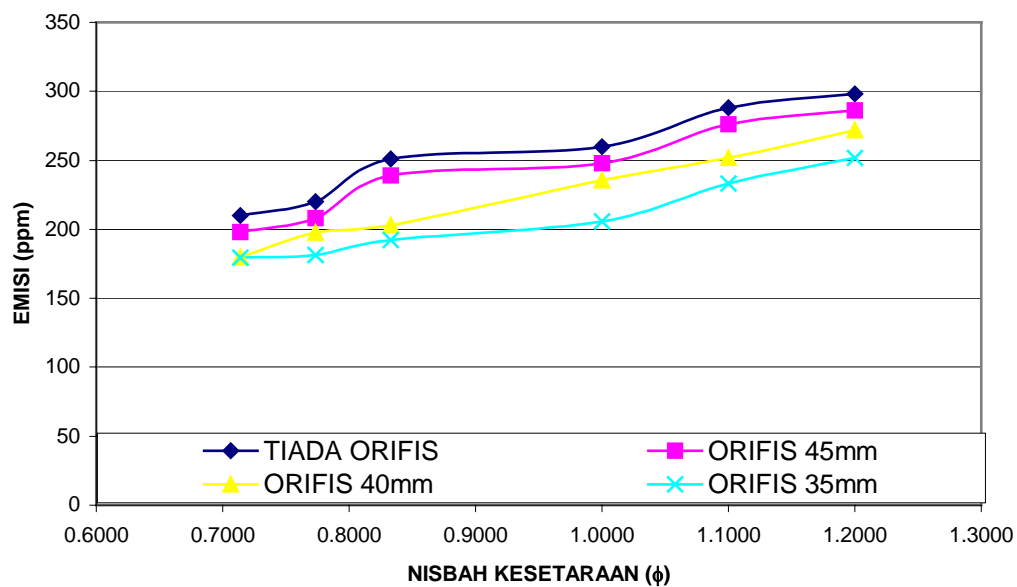
rendah dibandingkan dengan tanpa penyelitan plat orifis. Beliau juga menyimpulkan bahawa sekatan disebabkan penggunaan orifis meningkatkan kejatuhan tekanan yang akan membantu percampuran dalam pembakaran dan seterusnya mengurangkan masa mastautin nyalaan pada suhu tinggi dan seterusnya mengurangkan pembentukan NO_x . Sementara itu Mohd. Nazri (1999 dan 2001), juga telah menjalankan ujikaji pada pemusar aliran jejarian 45° dengan penyelitan plat orifis bernisbah luas orifis 0.875, 0.750 dan 0.625 menggunakan bahan api gas asli serta kejatuhan tekanan 20mmH₂O dan 40mmH₂O masing-masing. Beliau menunjukkan penggunaan orifis bernisbah luas orifis yang terkecil memberikan nilai emisi NO_x yang terendah untuk semua nisbah kesetaraan, ϕ dari 0.4 hingga 1.0.



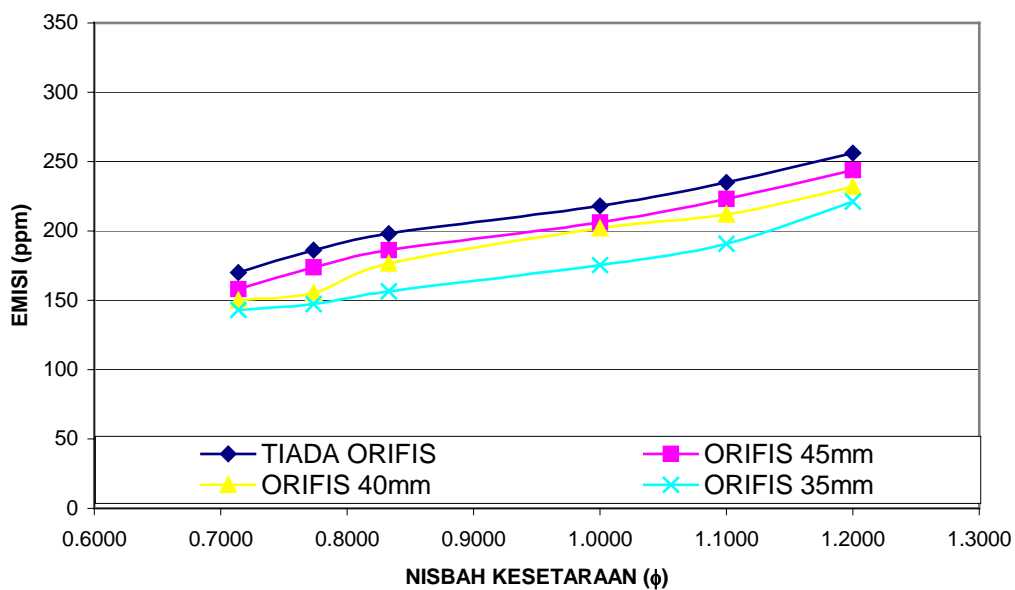
Rajah 5.1 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=0.780, variasi orifis



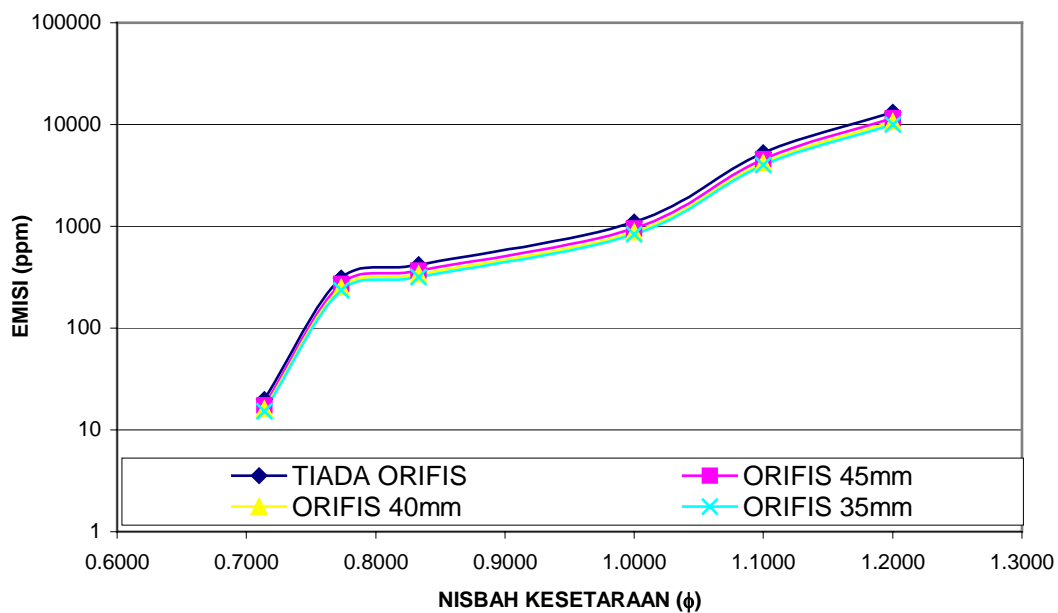
Rajah 5.2 Emisi oksida nitrogen (NO_x) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=1.427, variasi orifis



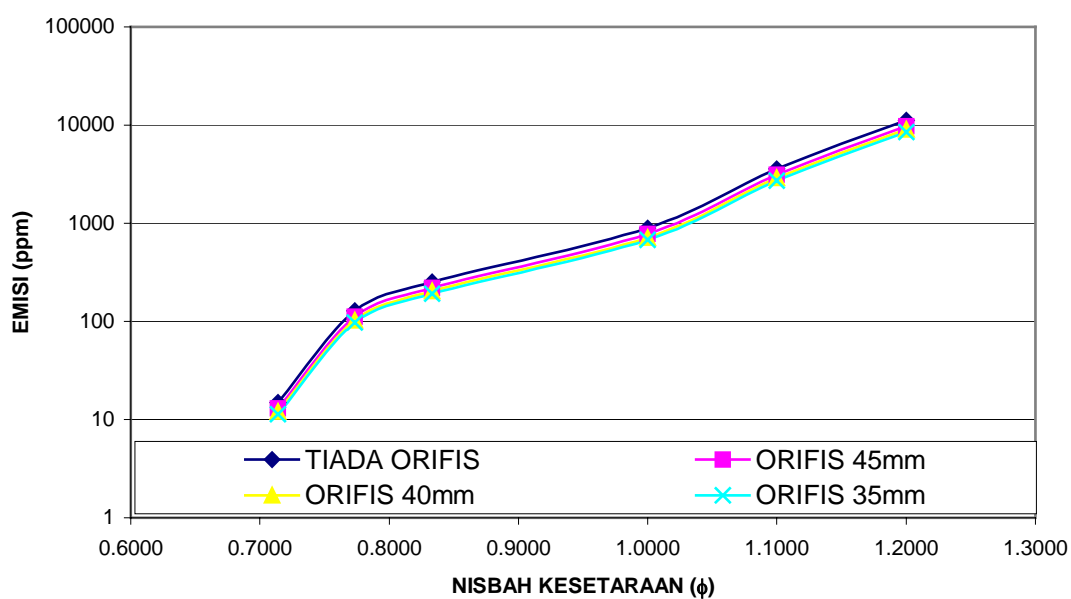
Rajah 5.3 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=0.780, variasi orifis



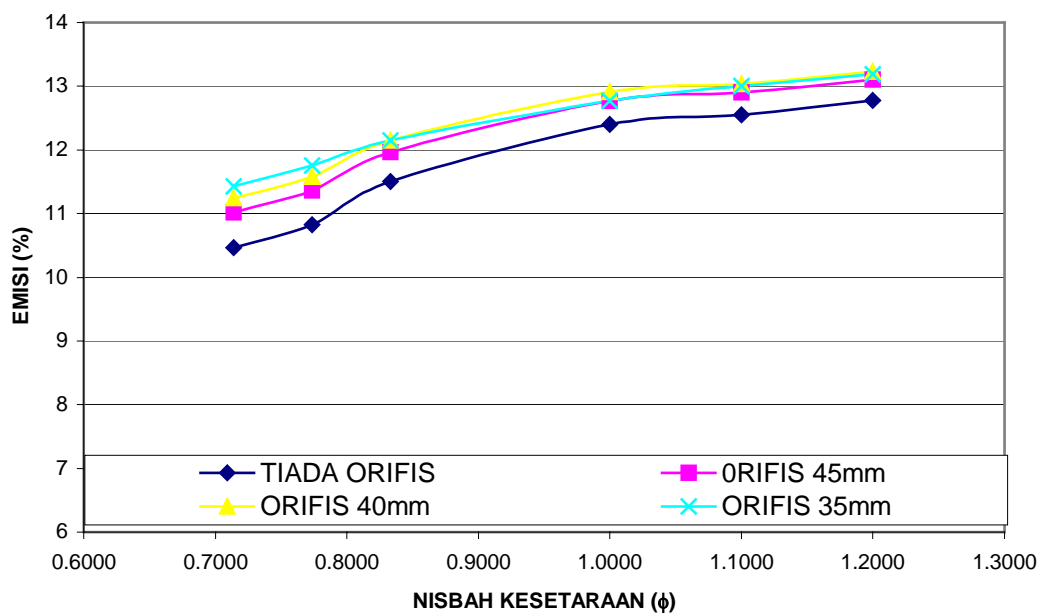
Rajah 5.4 Emisi karbon monoksida (CO) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemutar udara: SN=1.427, variasi orifis



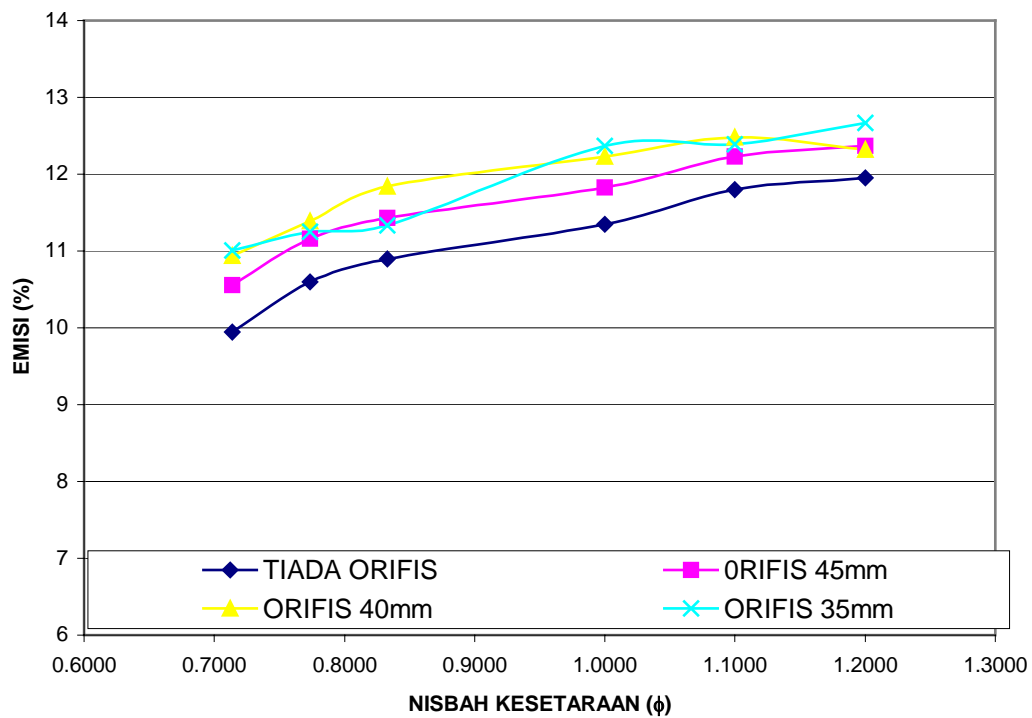
Rajah 5.5 Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemutar udara: SN=0.780, variasi orifis



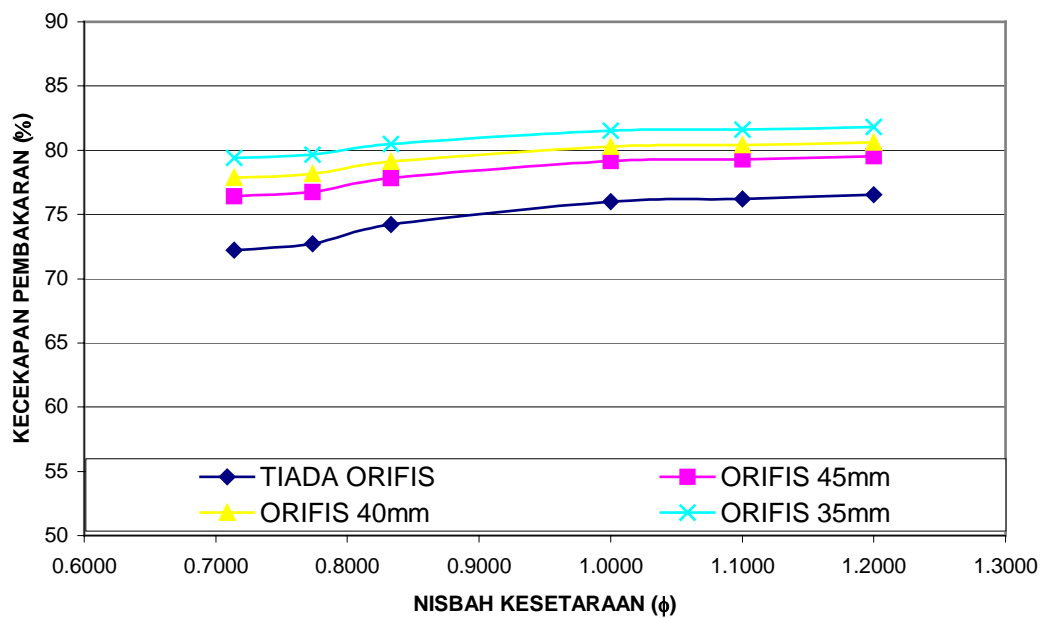
Rajah 5.6 Emisi hidrokarbon tidak terbakar (UHC) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=1.427, variasi orifis



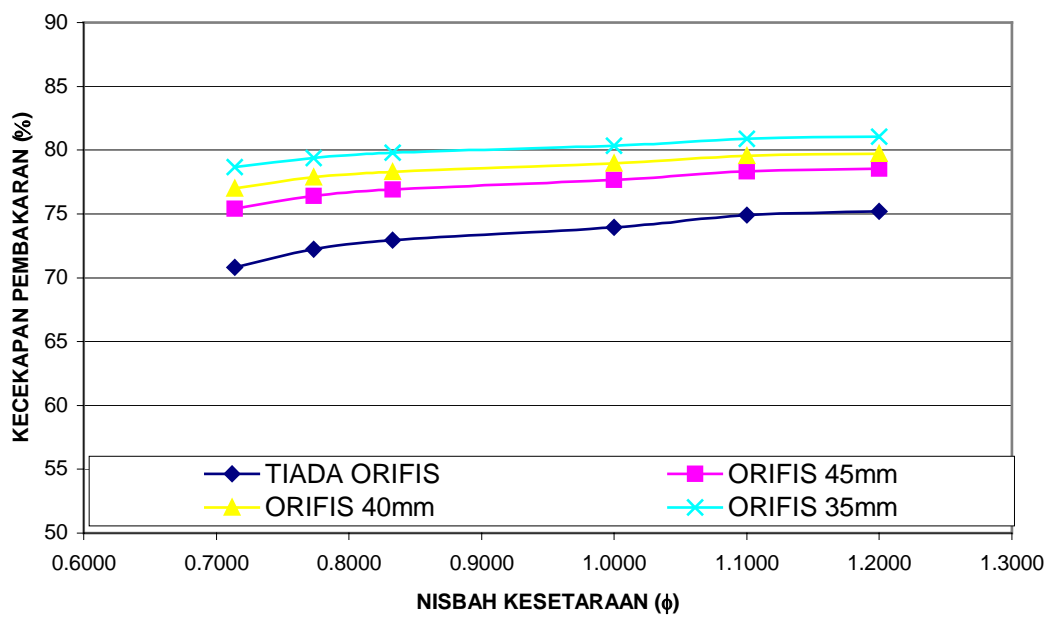
Rajah 5.7 Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=0.780, variasi orifis



Rajah 5.8 Emisi karbon dioksida (CO_2) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: $\text{SN}=1.427$, variasi orifis



Rajah 5.9 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: $\text{SN}=0.780$, variasi orifis



Rajah 5.10 Kecekapan pembakaran (η) melawan nisbah kesetaraan, (ϕ),
pemusar udara: SN=1.427, variasi orifis

BAB 6

KESIMPULAN DAN CADANGAN

Sebuah pembakar berbahan api cecair pada skala makmal telah dikaji dan dianalisis menggunakan pemusar udara aliran jejarian dan pengubahsuaian dengan menyelitkan plat orifis untuk memperbaiki prestasi pembakaran. Prestasi dilihat dari aspek pengurangan emisi yang dibebaskan dan kajian ciri-ciri pembentukan emisi tersebut dengan mengubah beberapa parameter dalam pembakaran.

6.1 Kesimpulan secara umum

Pembakar berbahan api cecair yang menggunakan pemusar aliran jejarian bersudut dari 10° hingga 70° telah dikaji dengan perubahan pembakaran seperti penyelitan plat orifis bernisbah luas 0.7-0.9 dan agihan udara kedua pada pelbagai nisbah agihan dari 10% hingga 40%. Kesemua kajian-kajian ini bagi melihat pembentukan emisi NO_x , CO, UHc dan CO_2 serta prestasi pembakaran dari aspek kecekapan pembakaran, η .

Rekabentuk pemusar aliran jejarian menggunakan bilah lengkung pelbagai sudut bagi mengelakkan pemisahan aliran semasa aliran udara utama masuk ke dalam kebuk dan bercampur dengan bahan api. Kesan dari pusaran ini juga mewujudkan aliran gelora yang mengakibatkan percampuran dapat berlaku pada tekanan yang rendah dan dalam masa yang singkat. Perubahan sudut bilah

mengakibatkan kenaikan kekuatan pusaran yang dilihat dari aspek nombor pusar (SN) yang mana mempengaruhi dan memperbaiki campuran udara dan bahan api yang mengurangkan pembentukan emisi semasa pembakaran. Penggunaan pemusar udara aliran jejarian dilihat dapat digunakan pada julat yang besar pada pembakar untuk sebarang keadaan operasi. Ini dibuktikan dengan ujikaji pembakaran yang melibatkan tiga keadaan operasi iaitu stoikiometri, cair dan kaya bahan api. Aliran udara secara pusaran menghasilkan tekanan yang rendah dan mewujudkan zon edaran semula yang mengakibatkan terdapat aliran udara panas hasil pembakaran bergerak semula ke kawasan percampuran di tekak pemusar yang mana bertindak sebagai spesis aktif membantu pembakaran. Keadaan ini juga dapat meningkatkan kestabilan pembakaran dan memudahkan pencucuhan nyalaan. Penggunaan pemusar ini juga mewujudkan nyalaan yang lebih pendek dan hanya memerlukan masa yang singkat untuk berlaku pembakaran lengkap. Ini dibuktikan apabila melihat profil suhu pembakaran melawan jarak pembakar di mana suhu turun dengan mendadak selepas suhu puncak. Kesan pembakaran aliran pusar ini hanya dipengaruhi oleh rekabentuk dan dimensi pemusar. Ini dilihat apabila ujikaji dijalankan pada dua jenis bahan api yang berbeza. Kelebihannya, kebuk pembakar dapat direka bentuk lebih pendek dan dapat menjimatkan ruang jika kaedah ini diaplikasikan pada dandang dan turbin gas.

Penyelitan plat orifis pada tekak pembakar dapat memperbaiki lagi corak pembakaran dan menghasilkan pelepasan emisi yang lebih rendah. Penyelitan orifis dengan kata lain akan merendahkan lagi tekanan pada keluaran pemusar. Fenomena ini dapat dilihat ketika ujian isoterma dijalankan ke atas pembakar. Nisbah luas orifis yang kecil menghasilkan nilai C_D yang rendah jika dibandingkan tanpa penggunaan orifis. Nilai C_D ini juga dilihat semakin rapat antara pemusar-pemusar pelbagai sudut apabila nisbah luas orifis mengecil dan menunjukkan penyelitan orifis memberi pengaruh yang lebih besar berbanding kesan perubahan sudut pemusar. Ini akan meninggikan kesan lapisan ricih gelora untuk membantu percampuran udara dan bahan api. Penyelitan orifis pada nisbah luas yang lebih rendah dapat memperbaiki percampuran udara bahan api di hulu pemusar. Ini dapat dilihat pada pelepasan emisi pada pembakar yang mana dengan penyelitan, nilai emisi didapati lebih rendah. Selain itu, penyelitan ini dapat mengelakkan bahan api memasuki tekak pemusar semula disebabkan aliran edaran semula yang mana akan mewujudkan zon kaya

bahan api yang akan mengganggu percampuran dan meningkatkan pembentukan CO dan UHc.

6.2 Kesimpulan tentang emisi pembakaran

Kajian pembentukan emisi pada pembakar dijalankan berdasarkan perubahan-perubahan pada pembakar dan melihat perbandingan antaranya. Pada bahagian pertama, pemusar aliran jejarian yang dipelbagaikan sudut bilah bagi melihat kesan nombor pusar (SN) dalam pembentukan emisi. Dapat dilihat pemusar bersudut 60° (SN=1.427) memberikan prestasi yang terbaik dari segi pembentukan emisi. Emisi NO_x serendah 23ppm dapat dicapai pada nisbah kesetaraan 1.0 jika dibandingkan dengan pemusar-pemusar lain. Begitu juga dengan emisi-emisi lain. Penggunaan pemusar bersudut ini juga memberikan kesan emisi yang terbaik walaupun dengan penggunaan bahan api berlainan. Selepas dari sudut ini, dapat dilihat emisi NO_x terutamanya meningkat kerana saiz edaran semula yang besar dan bersuhu tinggi disebabkan gas panas yang dialirkan semula.

Penggunaan plat orifis memberi kesan yang besar terhadap emisi pembakaran. Emisi pembakaran terutama NO_x dilihat lebih rendah dengan penyelitan plat orifis pada semua nisbah luas. Emisi NO_x serendah 14ppm diperolehi pada nisbah kesetaraan 1.0 dengan penyelitan plat orifis bernisbah luas 0.7. Ini menunjukkan penurunan sebanyak hampir 40% jika dibandingkan dengan keputusan di atas. Emisi-emisi lain juga dilihat memberikan bacaan yang lebih baik dengan penyelitan plat orifis. Jika dilihat pada pelepasan gas karbon dioksida (CO_2), emisi ini meningkat apabila penyelitan menggunakan plat orifis yang lebih kecil. Ini menunjukkan pembakaran berlaku dengan lebih lengkap dan homogen yang mana pembakaran menghasilkan CO_2 yang lebih tinggi dan CO yang lebih rendah. Namun demikian gas CO_2 lebih stabil dan tidak toksik tetapi terlibat sebagai gas rumah hijau.

6.3 Cadangan penyelidikan pada masa akan datang

Kajian ini menunjukkan pembakaran menggunakan pemusar udara aliran jejarian yang bersudut besar menghasilkan emisi yang rendah. Kajian lebih mendalam dapat dijalankan dengan mereka bentuk pemusar yang sudut masukannya boleh divariasikan supaya diperoleh sudut bilah yang paling sesuai untuk pembakaran. Julat variasi sudut bilah adalah antara 55° hingga 70° . Kajian lebih mendalam juga boleh dibuat menggunakan pemusar udara bersaiz lebih besar (skala pandu) untuk melihat kesan pembakaran pada suhu yang lebih tinggi dan penggunaan bahan api yang lebih berat.

Kesan edaran semula pada pembakar perlu dibuat kajian dengan lebih mendalam dari ujikaji isoterma seperti mendapatkan profil halaju sepanjang kebuk pembakar dan dari pusat pemusar hingga ke dinding pembakar. Dengan kaedah ini tekanan dinamik berhampiran keluaran pemusar dan sepanjang kebuk diperolehi. Profil ini penting bagi melihat ragam aliran balikan dan fenomena gelora di dalam pembakar pembakar.

Penggunaan agihan udara sekunder dilihat mempunyai potensi untuk dibangunkan. Kajian reka bentuk pembakar supaya agihan udara kedua juga mengalami pusaran yang mana dijangkakan akan dapat membantu melengkapkan pembakaran di dalam kebuk pembakar seperti mana diketahui aliran pusar dapat memperbaiki percampuran udara bahan api. Agihan ini juga berkemungkinan besar dapat dijalankan lebih daripada dua peringkat jika pembakar bersaiz lebih besar digunakan.

Penggunaan perisian komputer seperti analisis menggunakan dinamik bendalir berkomputer (CFD) seperti perisian FLUENT dilihat akan dapat meramalkan ciri-ciri pembakaran yang berlaku di dalam kebuk pembakar. Sebarang perubahan dari segi sudut bilah, kedalaman bilah dan diameter pemusar boleh disimulasikan sama ada melalui keadaan isoterma dan pembakaran. Prestasi pembakar seperti pembentukan emisi dan kecekapan pembakaran dapat diramal terlebih dahulu sebelum ujikaji sebenar dijalankan. Simulasi ini perlu sebelum ujikaji

sebenar kerana ujikaji hanya dijalankan pada keadaan dan rekabentuk yang terbaik. Ini dapat menjimatkan masa dan kos bahan.

RUJUKAN

Ahmad Suhaimi,(1994), “Gaseous Fuel Gas Turbine For Low Emissions.”, Department of Fuel and Energy, University of Leeds, Tesis PhD.

Ahmad, N.T., Andrews, G.E., Kowkabi, M. dan Sharif S.F., (1985), “Centrifugal Mixing in Gas and Liquid Fuelled Lean Swirled Stabilized Primary Zone”, *ASME*. 85-GT-103.

Al-Kabie, H.S., (1989). *Radial Swirlers for Low Emissions Gas Turbine Combustion*. University of Leeds, Dept. of Fuel and Energy: PhD.

Anderson D.N.,(1975), “*Effect of Equivalence Ratio and Dwell Time on Exhaust Emissions from an Experimental Premixed Prevaporising Burner*”, ASME Paper 75-GT-69.

Bahr D.W., (1973), Technology for Reduction of Aircraft Turbine Engine Exhaust Emissions Paper 29, “*Atmospheric Pollution by Aircraft Engine*”, AGARD CP-125, Advisory Group for Aerospace Research and Development.

Ballal, D.R. dan Lefebvre, A.H. (1979), “ Weak Extinction Limits of Turbulent Flowing Mixtures”, *Journal Engineering for Power*. Vol. 101. pp.343-348.

Ballester, J.M. *et al.* (1997), ‘Investigation of Low NO_x strategies for Natural Gas Combustion.’, *Fuel*, Vol. 76 pp 435-446, Elsevier Science Ltd.

Bathie, W.B., (1992), “Asas turbin gas (terjemahan)”, Penerbit Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru.

Beer, J.M., and Chigier N.A., (1972). *Combustion Aerodynamics*. Applied Science Publishers Ltd.

Beltagui, S.A dan MacCallum, N.R.L., (1976), "Aerodynamics of vane-swirled flames in furnaces", *Journal of Institute of Fuel*, hlm 183-193.

Beltagui, S.A dan MacCallum, N.R.L., (1988), "Characteristics of enclosed swirl flames with peripheral fuel injection", *Journal of Institute of Fuel*, hlm 3-16.

Blazowski, W.S dan Walsh, D.E. (1975). Catalytic Combustion: An Important Consideration for Future Applications. *Combustion Science Technologies*. Vol.10.pp.233-244

Bowman, C. T., (1992). "Control of Combustion-Generated Nitrogen Oxide Emissions: Technology Driven by Regulation", *Proceedings of the Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. Combustion Institute, Pittsburgh.

British Standards Institution, BS 1041:1992, "Temperature Measurement", Part 4. Guide to the Selection and Use of Thermocouples.

British Standards Institution, BS 799:1981, "Oil Burning Equipment" Part 2. Vaporizing Burners.

British Standards Institution, BS 845: 1987, "Assessing Thermal Performance of Boilers for Steam, Hot Water and Temperature Heat transfer fluids" Part 2. Concise Procedure.

Charles, R.E. dan Samuelson, G.S.,(1988), "An Experimental Data Base for the Computational Fluid of Combustion", ASME paper 88-GT-25.

Claypole, T.C., dan Syred N., (1981), 'The Effect of Swirl Burner Aerodynamics on NO_x Formation.' Eighteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 81-89, The Combustion Institute.

De Soete, G. G., 'Overall Reaction Rates of NO and N₂ formation from Fuel Nitrogen', *Fifteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1093-1102.

Dean, A. J, Hanson, R. K. dan Bowman, C. T. (1990). 'High Temperature Shock Tube Study of Reactions of CH and C-Atoms with N₂.', *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 259-265.

Delavan, (2000), "A Total Look at Oil Burner Nozzles", Delavan Spray Technologies: Fuel Metering Production Operation, South Carolina.

Demetri, E.P.,(1974), "Effect of major design and operation parameter on achieving low emissions from gas turbine combustor", *Fluid Mechanics of Combustion*, ASME, hlm. 233-253.

Edwards, J. B., (1974), 'Combustion: Formation and Emission of Trace Species.', Michigan, USA: Ann Arbor Science Publishers, Inc.

Environmental Quality Act and Regulation Malaysia, Act. 127, MDC Publisher Printers Sdn. Bhd.

Escott, N.H.,(1993), "*Ultra Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber Design*", University of Leeds, Department of Fuel and Energy, PhD.

Fenimore, C. P. (1970), "*Destruction of NO by NH₃ in Lean burnt Gases*", *Combustion and Flame*. (37): 245-250

Fletcher R.S. dan Lefebvre A.H., (1976), "*Gas Turbine Engine*", Science Research Council Report on Combustion Generated Pollution, HMSO.

Flury, F. and Zernick, F. (1931). 'Schadliche Gas.', Berlin, Springer.

Fricker, N. dan Leuckel, W., (1976), "The Characteristics of Swirl-stabilized Natural Gas Flames Part 3: The effect of swirl and burner mouth geometriy on flame stability", *Journal of Institute of Fuel*, hlm 152-160.

Gerhold, B.W., Fenimore C.P., P.K. Dederick, (1979), 'Two-stage Combustion of Plain and N Doped Oil', 17th Symp. Of Combustion, The Combustion Institute.

Graves, C.C. dan Scull, W.E., (1960), "Mixing process, design and performance of gas turbine power plant", *High Speed Aerodynamics and Jet Propulsion*, Princeton, hlm. 166-245.

Gupta A.K., Lilley D.G. and N. Syred, (1984), 'Swirl Flow', Abacus Press. Great Britain.

Gupta, M.C., Sriramulu, V. dan Domkunwar, V.M., (1979), "Factors controlling stability of swirling flames at diffuser in gas turbine", *Journal of Institute of Energy*, hlm. 17-20.

Heberling, P. V. (1976). Prompt NO Measurements at high Pressures, *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 159-168.

Henry M. C., Ehrlich, R., Blair, W. H., 'Effect of Nitrogen Dioxide on Resistance of Squirrel Monkeys to Klebsiella Pneumoniae Infection.', *Arch. Environ. Health*. (18): 580.

Iverach, D., Basden, K. S., Kirvo, N. Y. (1973). 'Formation of Nitric-Oxide in Fuel-Lean and Fuel-Rich Flames.', *Fourteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 767-775.

Khalil, K.H., El-Mahallawi, F.M. dan Moneib, H.A., (1977), "Effect of combustion air swirl on the flow pattern in a cylindrical oil fired furnace", *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*, hlm.135-143, The Combustion Institute.

Kilik, E., (1976), "The influence of swirler design parameter on the aerodynamics of the downstream recirculation region", School of Mechanical Engineering, Cranfield Institute of Technology, England :PhD.

Kim, M.N. (1995), "*Design of Low NO_x Gas Turbine Combustion Chamber*", University of Leeds, Dept. of Fuel and Energy: PhD.

Knight, M.A. dan Walker, R.B.,(1957), “The component pressure losses in combustion chamber”,Aeronautical Research Council, England.

L. Khezzar, (1998),’Velocity Measurement in the Near Field of a Radial Swirler.’ Experimental Thermal and Fluid Science, Vol 16, pp 230-236, Elsevier Science Inc.
 Lefebvre, A.H. dan Durrant, T., (1960), “Design Characteristics Affecting Gas Turbine Combustion Performance”, Esso Air World, jld. 13, no. 3, hlm 64-69.
 Lefebvre, A.H., (1983), “*Gas Turbine Combustion*”,Hemisphere Publishing Corporation.

Lindackers, D., Burmeister, M. dan Roth, P. (1990). ‘Perturbation Studies of High Temperature C and CH Reactions with N₂ and NO’, *Twenty-Third Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 251-257.
 Lipfert F.W.,(1972), “*Correlation of Gas Turbine Emissions Data*”,ASME Paper 72-GT-60.

Lister, D.H. dan Wedlock, M.I. (1978), ‘Measurement of Emissions Variability of a Large Aero-Engine.’, ASME Paper No. 78-GT-75.

Longcore, J.R., Boyd, H., Brooks, R.T., Haramis G.M., McNicol D.K., Newman, J.R. Smith K.A., and Stearns, F. (1993) Acidic Depositions: Effects on Wildlife and Habitats. *Wildlife Society Tech. Rev.* 93-1: 42.

Masataka A., (2000), “Flue Gas Recirculation for Low NO_x Combsution System”, *2000 International Joint Power Generation Conference*. Florida.

Mathur, M.L. dan Maccallum, N.R.L.,(1967), “Swirling air jets issuing from vane swirling part 1: Free jets”, Journal of Institute of Fuel, hlm 214-225.

McLaughlin, B.R., Jones Jr., E.A. dan Lewis, E.C. (1997). Selective Catalyst Reduction (SCR) Retrofit at San Diego Gas and Electric Company South Bay Generation Station. *EPRI-DOE-EPA Combined Utility Air Pollution Control Symposium*. Washington.

Mellor, A.M., (1976), "Gas Turbine Engine Pollution", Prog. Energy Combustion Science, Pergamon Press, bil. 1, hlm. 111-133.

Mestre, A. (1974), 'Efficiency and Pollutant Formation Studies in a Swirling Flow Combuster.' Fluid Mechanics of Combustion, Edited by Dussord *et al.*, New York: The American Society of Mech.Engineers.

Michaud, M. G. Westmoreland, P. R. dan Feitelberg, A. S. (1992). Chemical Mechanism of NO_x Formation for Gas Turbine Conditions. *Twenty-Fourth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 879-887.

Mikus, T. dan Heywood, J.B. (1971), "The Automotive gas Turbine and Nitrix Oxide Emissions", *Combustions Science Technology*. Vol 4. pp. 149-158.

Miller, H., (1998), "Gas turbine", G E Power System, Schenectady New York, Bab 57, Mechanical Engineering Handbook 2nd Ed., John Willey and Son Inc.

Miller, J. A. dan Bowman, C. T. (1989), "*Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion*", *Progress in energy and Combustion Science*. (15): 287-338.

Milosavljevic, V.D., Taylor, A.M.K.P., dan Whitelaw, J.H., (1990), 'The Influence of Burner Geometry and Flow Rates on Stabilised and Symmetry of Swirl-Stabilised Nonpremixed Flames.', Combustion and Flame, The Combustion Institute, New York, jld. 80 hlm. 196-208.

Miyauchi, T., Mori, Y., dan Imamura, A. A. (1976). 'A Study of Nitric Oxide Formation in Fuel- Rich Hydrocarbon Flames: Role of Cyanic Species, H, OH, and O.', *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 1073- 1082.

Mohammad Nazri, (1997), 'Emissions from Gas Burner, Their Impact on the Environment and Abatement Technique: A Review', Jurnal Mekanikal, Jilid 1, 50-70.

Mohd Nazri, M.N., Andrew, G.E. dan Mk Padi, M.C., (1999), “The effect of orifice plate insertion of low NO_x radial swirl burner performance (simulated variable area burner)”, Proceeding of the World Renewable Energy congress’99, Malaysia.

Mohd Nazri, M.N., (2002), “ Emissions reduction from oil burner applying orifice plat insertion”, 4th Asian Science and Technology Congress 2002, Kuala Lumpur.

Mohd. Nazri, M.N, (1999), ‘Emissions Reduction From Gas Bunner System Applying Swirling Flows.’, Malaysian Science and Technology Congress ’99, Kuching Hilton, Malaysia .

Mohd. Radzi M.Y., (2002). *A Study of Swirled Air Method in The Reduction of Emissions from the Combustion of Liquid Fuel*, University Teknologi Malaysia, Dept. Aeronautics and Automotive. Masters Thesis.

Mularz, E.J., Wear, J.D. dan Verbulecz, P.W. (1975), “ Exhaust Pollutant Emissions from Swirl-Can Combustor Module Arrays at Parametric Test Conditions”, *NASA TM X-3237*.

Nimmo, W., E. Hampartsoumian, K. Sedighi dan Williams, (1991), ‘Control of NO_x Emissions by Combustion Air-staging: the measurement of NH₃, HCN, NO and N₂O concentrations in fuel-oil flames.’ *Journal of the Inst. Of Energy*, Vol. 64, pp 128-134.

Noel de Nevers, (1995), ‘Air Pollution Control Engineering’, McGraw Hill Inc. U.S.

Norster, E.R. dan Lefebvre, A.H., (1972), “*Effect of Fuel Injection Method on Gas Turbine Combustion System*”, dalam Cornelius, W. dan Agnew, W.G., *Emissions from Gas Turbine Combustion System*, hlm 255-278, Plenum, New York.

Pershing, D. W., Cichanowicz, J. E., England, G. C., Heap, M.P. dan Martin, G. B. (1978). The Influence of Fuel Composition and Flame Temperature on the Formation of Thermal and Fuel NO_x in Residual Oil Flames. *Seventeenth Symposium (International) on Combustion*. Pittsburgh: The Combustion Institute, 715-725.

Rafia Afroz, (2002), 'Review of Air Pollution and Health Impacts in Malaysia', Academic Press, Elsevier Science: 71-77.

Rao, A.N. *et al.*, (1983), "Experimental and theoretical investigations of vane-generated swirling flows in a circular chamber", Journal of Institute of Energy, hlm. 137-144.

Rhode, D.L. *et al.*, (1983), "Mean flowfields in axisymmetric Combustor geometries with swirl", AIAA Journal, Jld. 21, no. 4, hlm. 593-600.

Roffe G. dan Venkataramani K.S., (1975) "*Emissions Measurement for Lean Premixed Propane/ Air System at Pressure up to 30 Atmosphere*", NASA CR-159421.

Sarofim, A. S. dan Flagan, R. C. (1976). NO_x Control of Stationary Combustion Sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. 2.1-25.

Shy C. M., Creason, J. P., Pearlman M. E., McChain, K. E., Benson, F. B., Young, M. M. (1970). Effects of Community Exposure to Nitrogen Dioxide. Incidence of Acute Respiratory Illness. *J.A.P.C.A.* (20): 582.

Sloss, L. L., hajalmarsson, A. K., Soud, H. N., Campbell, L. M., Stone, D. K., Shareef, G. S., Emmel, T., Maibodi, M., Livengood, C. D., Markussen, J. (1992). Nitrogen Oxides Control Technology Fact Book. Leslie S. Sloss (eds), USA: Noyes data Corporation.

Streichsbier, M. (1998). *Non-Catalytic NO_x Removal from Gas Turbine Exhaust with Cyanuric Acid in a Recirculating Reactor*. University of California, Berkeley: PhD. Thesis.

Syred, N. dan Beer, J.M. (1974). Combustion in Swirling Flows: A Review. *Combustion and Flame*. Vol. 23.pp. 143-201.

Technical data on Fuel, 7th Edition. 1977. *The British National Committee, World Power Conference*. London. Edited by H.M. Spiers.

U. S, EPA (1991). *Source Book: Nitrogen Oxides Control Technology Data*. Report No: EPA-600/2-91-029. Government Printing Office, Washing D.C.

Waibel, R. T. (1993). Ultra Low NO_x Burners for Industrial Process Heaters. *Second International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment*. Lisbon.

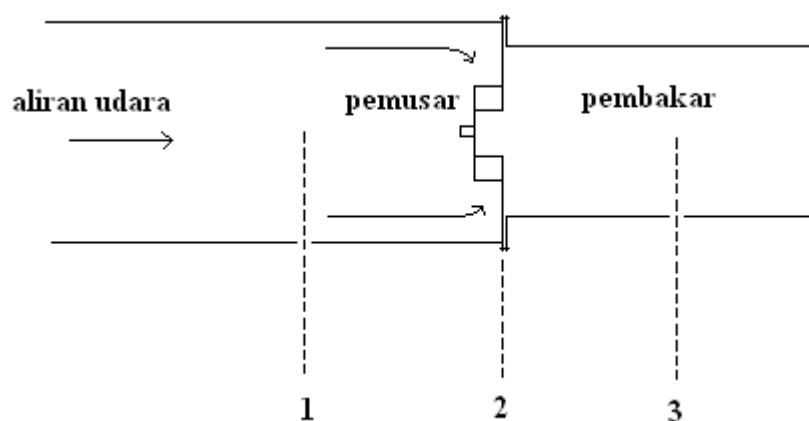
Williams, A. (1990), "Combustion of Liquid Fuel Sprays", Butterworth-Heinemann Ltd., London.

LAMPIRAN

LAMPIRAN A

A-1 Kejatuhan tekanan pemusar

Kejatuhan tekanan pemusar dan pekali discas diukur berdasarkan beza tekanan statik antara bahagian 1 dan bahagian 3.



Dengan menganggap aliran pada satah 1 dan 3 adalah seragam, beza kejatuhan tekanan statik pada satah 1 diukur dengan merujuk kepada satah 3 (tekanan atmosfera).

$$p = p_{1T} - p_{3T} = (h_{1T} - h_{3T}) \rho_w \cdot g \quad \dots A1$$

Jika di anggap halaju udara adalah malar

$$p = p_{1S} - p_{3S} = (h_{1S} - h_{3S}) \rho_w \cdot g \quad \dots A2$$

$$p = \Delta h (9810) \quad \dots A3$$

Kejatuhan tekanan berdasarkan kepada peratus tekanan di hilir

$$\Delta p/p\% = \Delta p * 100/(p_a + \Delta p) \quad \dots A4$$

dengan

- h = tekanan dalam H_2O
- Δp = kehilangan tekanan (N/m^2)
- ρ_w = ketumpatan air (Kg/m^3)
- g = pecutan graviti
- Δh = beza tekanan dalam H_2O
- p_a = tekanan atmosfera (N/m^2)

A-2 Pekali discas

Kejatuhan tekanan dapat ditunjukkan dalam bentuk pekali discas, C_D

$$\dot{m} = C_D \cdot A_2 (2\rho\Delta p)^{0.5} \quad \dots A5$$

dengan

- Δp = kehilangan tekanan yang diukur
- A_2 = luas satah tekak pemusar
- ρ = ketumpatan udara masukan
- \dot{m} = kadar alir udara
- C_D = pekali discas keseluruhan

$$C_D = \dot{m}/A_2 (2\rho\Delta p)^{0.5} \quad \dots A6$$

LAMPIRAN B

B-1 Komposisi kimia bahan api (Analisis CHN)

a. Bahan api diesel komersial

Jumlah karbon	68.05% (wt/wt)
Jumlah hidrogen	13.39% (wt/wt)
Jumlah nitrogen	0%

b. Bahan api kerosin komersial

Jumlah karbon	63.81% (wt/wt)
Jumlah hidrogen	14.00% (wt/wt)
Jumlah nitrogen	0%

B-2 Penukaran nilai kalori kasar (Q_{gr}) kepada nilai kalori bersih (Q_{net})

Penukaran ini berdasarkan **ASTM D240-76**, '*Heat of Combustion of Liquid Hydrocarbon Fuel by Bomb Calorimeter*.' oleh An American National Standard.

$$Q_{net} = 1.8 Q_{gr} - 91.23 \times H \quad \dots B1$$

Dengan

Q_{net} = nilai kalori bersih, Btu/lb (1 Btu/lb = 2.326 kJ/kg)

Q_{gr} = nilai kalori kasar, cal/g (1 cal/g = 4.1868 kJ/kg)

H = komposisi hidrogen dalam sampel, %

LAMPIRAN C

C-1 Pengiraan kecekapan pembakaran

Kecekapan pembakaran dikira berdasarkan *British Standard :BS845*.

Terdapat 2 sumber yang menyebabkan pengurangan kecekapan pembakaran semasa pembakaran bahan api cecair.

- a. Pengurangan disebabkan gas ekszos
 - kehilangan gas ekszos kering
 - kehilangan disebabkan kelembapan
 - kepekaan terhadap wap air
 - pengaruh gas tidak terbakar
- b. Pengurangan disebabkan bendasing
 - abu pembakaran
 - habuk pembakaran

Pengiraan kecekapan

Data bahan api yang diketahui:

Q_{gr} - nilai kalori kasar (kJ/kg)

Q_{net} - nilai kalori bersih (kJ/kg)

K_1 - pekali berdasarkan nilai kalori kasar dan bersih

K_{1g} - $(255 \times \% \text{ karbon dalam bahan api})/Q_{gr}$

K_{1n} - $(255 \times \% \text{ karbon dalam bahan api})/Q_{net}$

K_2 - % maksimum secara teori CO_2 (ketika kering)

K_3 - % kehilangan akibat kelembapan

K_4 - % kehilangan karbon tak terbakar (48 untuk bahan api petroleum)

Data yang diukur

T_f - suhu gas ekzos ($^{\circ}\text{C}$)

T_i - suhu masukan udara ($^{\circ}\text{C}$)

O_{2m} - % oksigen dalam gas ekzos

Data yang dikira

T_{net} - beza suhu ($^{\circ}\text{C}$)

η_{net} - % kecekapan pembakaran

$$\eta_{\text{net}} = 100\% - \text{kehilangan gas ekzos kering} \quad \dots C1$$

$$\text{Kehilangan gas ekzos kering} = 20.9 \times K1n \times (T_{\text{net}}) / K2 \times (20.9 - \% \text{O}_{2m}) \quad \dots C2$$

LAMPIRAN D**D-1 Reka bentuk pemusar aliran jejarian****Pemusar 0°****Pemusar 10°****Pemusar 20°****Pemusar 30°****Pemusar 40°****Pemusar 45°**



Pemusar 50°



Pemusar 60°



Pemusar 70°

D-2 Reka bentuk pembakar berbahan api cecair

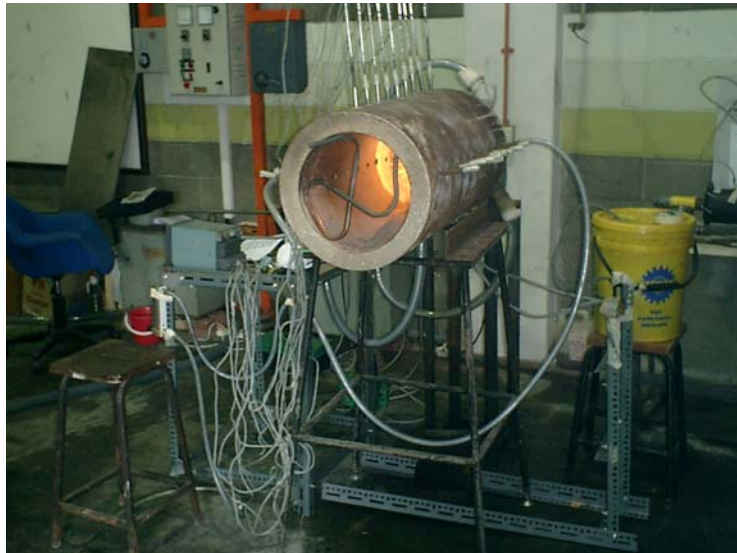
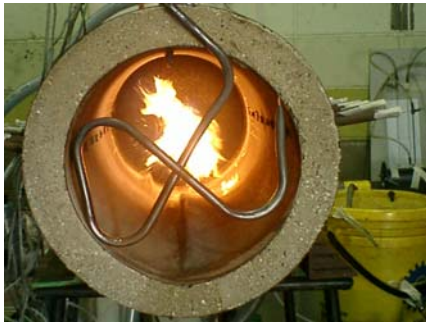
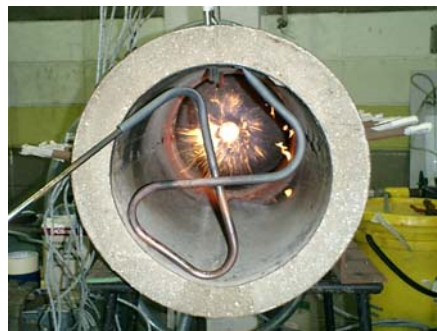


Foto rig ujikaji

D-3 Ujikaji pembakaran pemusar aliran jejarian (bahan api: diesel)**Pemusar 10°****Pemusar 60°****Pemusar 45° (orifis 45mm)****Pemusar 45° (orifis 35mm)**